

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lidija Levačić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

TROKOMPONENTNE PLINSKE MJEŠAVINE ZA MAG ZAVARIVANJE

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

.

Studentica:

Lidija Levačić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Od srca zahvaljujem svom mentoru, doc. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom strpljenju i korisnim informacijama te podršci tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije što su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog dijela rada, te asistentici Maji Jurica na pomoći i korisnim savjetima tijekom provođenja eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji i dečku na podršci i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada kao i tokom studija.

Ovaj diplomski rad posvećujem svom ocu, Zlatku Levačiću, jer se zbog njega danas nalazim na željenom putu života.

Lidija Levačić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LIDIJA LEVAČIĆ**

Mat. br.: **0035182011**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TROKOMPONENTNE PLINSKE MJEŠAVINE ZA MAG ZAVARIVANJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **THREECOMPONENT GAS MIXTURES FOR MAG WELDING**

Opis zadatka:

Razvoj plinskih mješavina omogućuje primjenu MAG postupka zavarivanja u različitim proizvodnim uvjetima. Obzirom na pojavu trokomponentnih plinskih mješavina koje sadrže argon, kisik i ugljični dioksid potrebno je proučiti mehanizme djelovanja pojedinih komponenti na proces zavarivanja te usporediti sa konvencionalnim dvokomponentnim mješavinama i čistim ugljičnim dioksidom. Opisati normu HRN EN ISO 14175 i klasificirati predmetne trokomponentne mješavine.

U eksperimentalnom djelu za odabrane trokomponentne aktivne mješavine odrediti ponašanje u različitim područjima prijenosa metala uključujući i impulsni luk. Posebno analizirati zavarivanje na tankim i debelim limovima kao i različitim položajima zavarivanja. Također uzeti u obzir i kvalitetu pripreme površine kao i mogućnost zavarivanja preko temeljnog premaza. U konačnici donijeti zaključke o primjeni trokomponentnih mješavina u realnim proizvodnim uvjetima.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

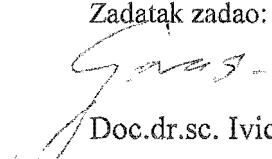
Rok predaje rada:

26. studenog 2015.


Predviđeni datum obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABELA.....	VII
POPIS OZNAKA.....	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY.....	XI
1 UVOD.....	1
2 MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	3
2.1 OPĆENITO O MAG POSTUPKU ZAVARIVANJA.....	3
2.2 IZVORI STRUJE U MAG ZAVARIVANJU.....	5
2.3 ULOGA ZAŠTITNOG PLINA PRI MAG ZAVARIVANJU.....	7
2.4 POROZNOST – NAJUČESTALIJI TIP GREŠKE PRI MAG ZAVARIVANJU.....	16
2.5 PLINSKE MJEŠAVINE U MAG ZAVARIVANJU.....	22
2.5.1 Dvokomponentne plinske mješavine.....	22
2.5.2 Trokomponentne plinske mješavine.....	28
3 EKSPERIMENTALNI DIO	31
3.1 MATERIJALI I METODE ZA PRVI DIO EKSPERIMENTA.....	32
3.1.1 Osnovni materijal.....	32
3.1.2 Prijenos metala u impulsnom električnom luku.....	33
3.1.3 Dodatni materijal.....	36
3.1.4 Uređaj za zavarivanje.....	37
3.1.5 Rezultati i rasprava prvog dijela eksperimenta.....	37
3.2 MATERIJALI I METODE ZA DRUGI DIO EKSPERIMENTA.....	44
3.2.1 Materijal podloge.....	44
3.2.2 Prijenos metala u štrcajućem električnom luku.....	45
3.2.3 Uređaj za zavarivanje.....	47
3.2.4 Rezultati i rasprava drugog dijela eksperimenta.....	48
3.3 MATERIJALI I METODE ZA TREĆI DIO EKSPERIMENTA.....	61
3.3.1 Prijenos metala u električnom luku kratkim spojevima.....	61
3.4 MATERIJALI I METODE ZA ČETVRTI DIO EKSPERIMENTA.....	64
3.4.1 Kritična struja pri zavarivanju.....	64

3.4.2	Rezultati četrvtog dijela eksperimenta.....	67
4	ZAKLJUČAK	70
5	LITERATURA.....	73

POPIS SLIKA

Slika 1.	Osnovne uloge zaštitnog plina pri MIG/MAG zavarivanju [1]	1
Slika 2.	Princip rada zaštitnog plina pri zavarivanju [2]	5
Slika 3.	Odnos struje i napona u električnom luku pri MAG zavarivanju [2]	5
Slika 4.	Toplinska vodljivost plinova ovisno o temperaturi	9
Slika 5.	Shematski prikaz ionizacije i disocijacije tehničkih plinova [6]	10
Slika 6.	Moguće kemijske reakcije pri MAG zavarivanju u zaštitnoj atmosferi CO ₂ [7]	11
Slika 7.	Utjecaj zaštitnog plina na izgled električnog luka pri MAG zavarivanju [8]	15
Slika 8.	Shematski prikaz otplinjavanja mjehurića plina iz metala zavara [10]	17
Slika 9.	Primjeri grešaka poroznosti nastalih pri MAG zavarivanju [10]	18
Slika 10.	Shematski prikaz uzroka nastajanja poroznosti pri MAG zavarivanju	20
Slika 11.	Podjela zaštitnih plinskih mješavina pri MAG zavarivanju shodno normi EN ISO 14175:2008	22
Slika 12.	Razlike u penetraciji kod dvokomponentnih plinskih mješavina u odnosu na čisti CO ₂ [11]	23
Slika 13.	Rezultat zavarivanja trokomponentnim plinskim mješavinama: A – <i>Ferroline C12 X2</i> , B – <i>Ferroline C6 XI</i> [14]	30
Slika 14.	Kvalitativni prikaz impulsnog zavarivanja [16]	35
Slika 15.	Mehanička svojstva i karakteristike dodatnog materijala za zavarivanje u prvom dijelu eksperimenta	36
Slika 16.	Trans Pulsed Snergic uređaj za MIG/MAG zavarivanje	37

Slika 17.	Rezultati zavarivanja čeličnih limova premazanih temeljnim premazom sa trokomponentnim plinskim mješavinama: 1A – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C6 X1</i> ; 1B – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C12 X2</i> .	38
Slika 18.	Rezultati zavarivanja čeličnih metalno čistih (sačmarenih) limova sa trokomponentnim plinskim mješavinama: 2A – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C6 X1</i> ; 2B – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C12 X2</i>	40
Slika 19.	Rezultati zavarivanja čeličnih metalno čistih (sačmarenih) limova, sa namjerno izazvanom općom korozijom (hrđa), pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina: 3A – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C6 X1</i> ; 3B – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C12 X2</i>	41
Slika 20.	Rezultati zavarivanja čeličnih nesačmarenih limova sa okujinom, pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina: 4A – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C6 X1</i> ; 4B – trokomponentna plinska mješavina <i>Ferroline C12 X2</i>	42
Slika 21.	Prijenos materijala u štrcajućem električnom luku [11]	46
Slika 22.	Oprema primjenjena za izvođenje drugog dijela eksperimenta	47
Slika 23.	Makro izbrusak uzorka C gdje je zavar izveden pod zaštitom: C1 - dvokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C18</i> ; C2 - trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C6 X1</i>	49
Slika 24.	Makro izbrusak uzorka D gdje je zavar izveden pod zaštitom: D1 - dvokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C18</i> ; D2 - trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C12 X2</i>	50

Slika 25.	Makro izbrusak uzorka E gdje je zavar izveden pod zaštitom: E1 - dvokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C12 X2</i> ; E2 - trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C6 X1</i>	51
Slika 26.	Analiza površine metala zavara E1 pomoću alata ImageJ	52
Slika 27.	Analiza površine bočne penetracije zavara E2 pomoću alata ImageJ	52
Slika 28.	Analiza površine dubinske penetracije zavara C1 pomoću alata ImageJ	53
Slika 29.	Dijagram usporedbe analiziranih površina zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: E1 – trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C12 X2</i> , E2 - trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C6 X1</i> i C1 - dvokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C18</i>	53
Slika 30.	Tvrdomjer marke REICHER KL2 za ispitivanje tvrdoće po Vickersu	55
Slika 31.	Raspored mjerenja vrijednosti tvrdoće po Vickersovoj metodi na makro izbrusku zavarenog spoja	56
Slika 32.	Dijagram distribucije tvrdoće zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: C1 – dvokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C18</i> , C2 – trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C6 X1</i>	57
Slika 33.	Dijagram distribucije tvrdoće zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: D1 – dvokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C18</i> , D2 – trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C12 X2</i>	58
Slika 34.	Dijagram distribucije tvrdoće zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: E1 – trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C12 X2</i> , D2 – trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C6 X1</i>	59
Slika 35.	Uptonov dijagram ovisnosti sadržaja ugljika i temperature o početku i završetku stvaranja martenzitne mikrostrukture u čelicima [19]	60
Slika 36.	Shema načina prijenosa metala u električnom luku kratkim spojevima [20]	62
Slika 37.	Slike zavarenih spojeva uzoraka F1, F2 i F3	63

Slika 38.	Utjecaj CO ₂ i/ili argona na vrijednost kritične struje zavarivanja pojedinog električnog luka	65
Slika 39.	Kvalitativni prikaz pojave kritične struje zavarivanja	66
Slika 40.	Usporedba vrijednosti kritične struje za različite plinske mješavine	67
Slika 41.	Rezultat zavarivanja kritičnom strujom pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C18</i>	67
Slika 42.	Rezultat zavarivanja kritičnom strujom pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C6 X1</i>	68
Slika 43.	Rezultat zavarivanja kritičnom strujom pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine <i>Ferroline C12 X2</i>	68

POPIS TABELA

Tabela 1.	Energija disocijacije i ionizacijskog potencijala plinova za zavarivanje [3]	8
Tabela 2.	Plinovi i plinske mješavine prema normi HR EN ISO 14175:2008 [3]	12
Tabela 3.	Osnovna svojstva zaštitnih plinova kod MAG zavarivanja prema normi HR EN ISO 14175:2008	13
Tabela 4.	Plinovi i plinske mješavine i njihovo produčje primjene s obzirom na vrstu materijala	14
Tabela 5.	Svojstva dvokomponentnih plinskih mješavina u odnosu na čisti CO ₂	24
Tabela 6.	Uobičajene dvokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [13]	27
Tabela 7.	Uobičajene trokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [13]	29
Tabela 8.	Kemijski sastav osnovnog materijala [15]	32
Tabela 9.	Plan pokusa za prvi dio eksperimenta zavarivanja trokomponentnim plinskim mješavinama	33
Tabela 10.	Tabela parametara zavarivanja čeličnih limova premazanih temeljnim premazom sa trokomponentnim plinskim mješavinama <i>Ferroline C6 X1</i> (1A) i <i>Ferroline C12 X2</i> (1B)	38
Tabela 11.	Tabela parametara zavarivanja metalno čistih (sačmarenih) čeličnih limova sa trokomponentnim plinskim mješavinama <i>Ferroline C6 X1</i> (2A) i <i>Ferroline C12 X2</i> (2B)	39
Tabela 12.	Tabela parametara zavarivanja metalno čistih (sačmarenih) čeličnih limova, sa namjerno izazvanom općom korozijom (hrdom), pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina <i>Ferroline C6 X1</i> (3A) i <i>Ferroline C12 X2</i> (3B)	40
Tabela 13.	Tabela parametara zavarivanja nesačmarenih čeličnih limova, sa površinom prekrivenom okujinom, pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina <i>Ferroline C6 X1</i> (4A) i <i>Ferroline C12 X2</i> (4B)	42

Tabela 14.	Kemijski sastav osnovnog materijala [17]	44
Tabela 15.	Plan pokusa za drugi dio eksperimenta zavarivanja dvokomponentnim i trokomponentnim plinskim mješavinama	45
Tabela 16.	Rezultati parametara zavarivanja uzorka C	48
Tabela 17.	Rezultati parametara zavarivanja uzorka D	49
Tabela 18.	Rezultati parametara zavarivanja uzorka E	50
Tabela 19.	Rezultati ispitivanja tvrdoće za uzorke C, D i E	57
Tabela 20.	Rezultati parametara zavarivanja uzoraka F1, F2 i F3	62

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	NAZIV
eV	J	elektronvolt
λ	W/cm*°C	toplinska vodljivost
ϑ	°C	temperatura izražena u Celzijusovim stupnjevima
T	K	temperatura izražena u Kelvinima
ρ	kg/m ³	gustoća
\varnothing	mm	promjer dodatnog materijala
t	s	vrijeme zavarivanja
U	V	napon zavarivanja
I	A	struja zavarivanja
$v_{\text{žice}}$	m/min	brzina odmotavanja dodatnog materijala (žice) pri zavarivanju
v_{zav}	cm/min ili mm/s	brzina zavarivanja
E	kJ/mm	unos topline pri zavarivanju
HV	HV 10	metoda mjerenja tvrdoće materijala po Vickersu sa opterećenjem od $F = 98,04 \text{ N}$
F	N	silu
h	mm	slobodni kraj žice

SAŽETAK

U teoretskom dijelu rada opisan je MAG proces zavarivanja te uloga zaštitnih plinova u MAG zavarivanju. Definirana su svojstva pojedinih tehničkih plinova koji se koriste za proizvodnju dvokomponentnih i trokomponentnih plinskih mješavina pri MAG zavarivanju. Opisani su tipovi grešaka koji se najčešće javljaju pri MAG zavarivanju, a posebice oni koji su povezani sa izborom plinske mješavine. Poseban naglasak je stavljen na svojstva trokomponentnih plinskih mješavina na bazi argona, ugljičnog dioksida i kisika (*Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2*) koje se koriste za zavarivanje općih konstrukcijskih čelika. Navedene trokomponentne plinske mješavine se uspoređuju sa svojstvima najčešće primjenjivane dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*, odnosno mješavine koja sadrži 82% argona i 18% CO₂. Nakon teoretskog dijela rada uslijedio je eksperimentalni rad.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su četiri različita ispitivanja:

- ručno MAG zavarivanje navedenim trokomponentnim plinskim mješavinama na različitim kvalitetama površine čeličnog lima,
- automatsko MAG zavarivanje u svrhu usporedbe makro izbrusaka zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom navedenih trokomponentnih plinskih mješavina i navedene dvokomponentne plinske mješavine,
- ručno MAG zavarivanje trokomponentnim odnosno dvokomponentnom plinskom mješavinom u prisilnom položaju zavarivanja,
- automatsko MAG zavarivanje trokomponentnim odnosno dvokomponentnom plinskom mješavinom u svrhu određivanja vrijednosti kritične struje zavarivanja.

Provedena je vizualna kontrola gore navedenih zavarenih spojeva, te ispitivanje tvrdoće makro izbrusaka. Rezultati zavarivanja potkrijepljeni su tabelama parametara zavarivanja te fotografijama zavarenih spojeva.

Ključne riječi: MAG, zaštitni plinovi, trokomponentne plinske mješavine, *Ferroline C6 X1*, *Ferroline C12 X2*, *Ferroline C18*

SUMMARY

In the theoretical part of this work the MAG welding process and the role of shielding gas in MAG welding are defined. The properties of certain industrial gases used in MAG welding technology are described. In particular are dual - component and three - component gas mixtures at MAG welding explained. The most common types of irregularities that occur in the MAG welding are defined, especially those associated with the selection of the gas mixture. Special emphasis is placed on the properties of ternary gas mixtures based on argon, carbon dioxide and oxygen (*Ferroline C6 X1* and *Ferroline C12 X2*) used for welding of mild steels. The above three-component gas mixtures are compared with the properties of the most commonly used two-component gas mixture *Ferroline C18*, or a mixture containing 82% argon and 18% CO₂. After the theoretical part of the work was followed by experimental work.

The experimental part of the work was carried out in four different tests:

- manual MAG welding mentioned three-component gas mixtures on different surface qualities of particular mild steel,
- automatic MAG welding for the comparison of macro thin sections of welds performed under the protection of the above three - component gas mixtures and the mentioned two-component gas mixture,
- manual MAG welding with three-component and two-component gas mixture in the forced position of welding,
- automatic MAG welding with three-component or two-component gas mixture for the purpose of determining the value of critical welding current.

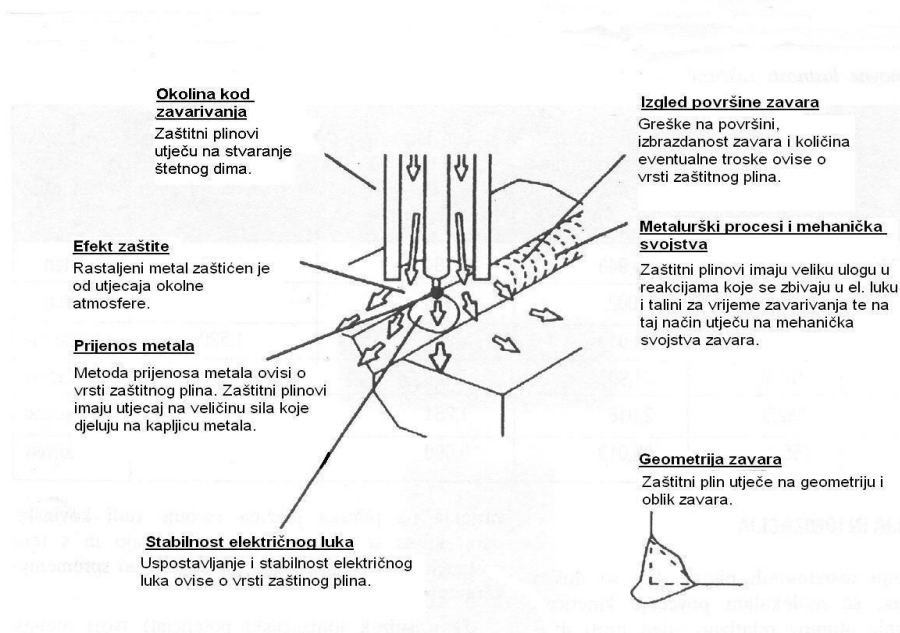
Of the above welded joints, visual inspection was conducted and macro hardness testing was performed on thin sections of this welds. Results are supported by the charts, tables with base welding parameters and photographs of welds.

Keywords: MAG, shielding gases, three-component gas mixtures, *Ferroline C6 X1*, *Ferroline C12 X2*, *Ferroline C18*

1 UVOD

Razvoj zaštitnih plinova za zavarivanje započinje 1920. godine, no zbog ograničenih mogućnosti tadašnje tehnologije taj razvoj postaje komercijalno upotrebljiv tek početkom 1940. godine, tijekom II. Svjetskog rata. Proteklih 50 godina, proizvodnja industrijskih plinova i plinskih mješavina postigla je respektabilna dostignuća, što se najviše odnosi na tehnologiju zavarivanja.

Prva proizvodnja plina zavarivanje započela je razvojem elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (*eng. TIG – Gas Tungsten Arc Welding*) u svrhu lakšeg spajanja pozicija pri konstrukciji borbenih zrakoplova. Rezultat razvoja zaštitnog plina za ovu tehnologiju zavarivanja bio je helij (He), iz kemijske skupine plemenitih plinova. Razvoj ovog prvog plina za zavarivanje potaknuo je nastanak i razvoj tzv. *GMAW (eng. Gas Metal Arc Welding)* postupka zavarivanja, odnosno elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom u zaštiti inertnog (*eng. MIG – Metal Inert Gas*) ili aktivnog (*eng. MAG – Metal Active Gas*) plina. Također, kasnije se pojavljuje tehnologija zavarivanja dodatnim materijalom u obliku praškom punjene žice (*eng. FCAW – Flux Core Arc Welding*) koja je zapravo inačica MIG/MAG zavarivanja sa širokim spektrom mogućnosti zavarivanja u različitim prisilnim položajima kao i ostvarivanja većih brzina zavarivanja. Primjer osnovnih uloga zaštitnog plina pri MIG/MAG zavarivanju prikazan je na slici 1.



Slika 1: Osnovne uloge zaštitnog plina pri MIG/MAG zavarivanju [1]

Osnovna i glavna značajka zaštitnih plinova u zavarivanju jest da izoliraju dušik (N_2) i kisik (O_2) izvan rastaljene metalne kupke pri samom odvijanju procesa zavarivanja. Najučestaliji zaštitni plin koji se koristio pri razvoju MAG zavarivanja bio je ugljični dioksid (CO_2) kao rezultat kemijskih analiza plinova koji nastaju izgaranjem obloge elektrode pri REL zavarivanju (Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom). Utvrdilo se da je CO_2 vrsta plina koja nastaje u najvećim količinama prilikom izgaranja obloge elektrode. No potrebe TIG zavarivanja bile su znatno drugačije od potreba zaštite taline pri MAG zavarivanju, a jedini dostupan inertan plin bio je helij, sve do pojave argona (Ar) ili tzv. „*the big A*“.

S obzirom da kod zavarivanja većine vrsta čelika, zbog svojih svojstava, čisti argon ne daje stabilan električni luk, tijekom povijesti su se počele razvijati plinske mješavine. Naime argon u kombinaciji sa različitim volumnim udjelima aktivnih komponenti (CO_2 , O_2 , N_2) daje stabilnije električni luk i bolji prijenos rastaljenih kapi metala od vrha elektrode do metalne kupke. Danas se osim dvokomponentnih plinskih mješavina mogu primjenjivati i trokomponentne plinske mješavine na način da su dvije različite vrste aktivnih plinskih komponenti (npr. CO_2 i O_2) kombinirane sa inertnom plinskom komponentom, argonom.

1 MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

1.1 Općenito o MAG postupku zavarivanja

Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova ili MIG/MAG zavarivanje je postupak zavarivanja taljenjem kod kojeg se metalna elektroda (žica) i osnovni materijal tale pod utjecajem električnog luka te skrućivanje oblikuju zavareni spoj. Proces se odvija u zaštiti plinova. Prema vrsti zaštitnih plinova ovaj način zavarivanja se dijeli na dva osnovna postupka;

MIG zavarivanje (oznaka 131 prema normi HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci - Nomenklatura postupaka i referentni brojevi), gdje se primjenjuje najčešće zaštitni plin argon i/ili helij. Ovim postupkom se zavaruju visokolegirani čelici, aluminij, aluminijske legure, bakar, bakrene legure, titan, titanske legure. Dodatni materijali su žice iz metala i legura koji odgovaraju osnovnom materijalu kojeg se zavaruje.

MAG zavarivanje (oznaka 135 prema normi HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci - Nomenklatura postupaka i referentni brojevi) je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina, gdje je aktivni plin koji se koristi CO₂ ili neka od mješavina s argonom, helijem ili kisikom.. Ovim postupkom se zavaruju nelegirani i niskolegirani čelici. Dodatni materijali su žice koje odgovaraju osnovnom materijalu. Primjenjuju se i praškom punjene žice. Budući da se kod ovog postupka pretežno primjenjuje plin ugljični dioksid (u daljnjem tekstu CO₂), vrlo često se za ovaj postupak koristi naziv CO₂ zavarivanje. Zaštitni plin ima ulogu zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja okoline te služi za ionizaciju vodljivog prostora za održavanje električnog luka. Električni luk je snažno i trajno pražnjenje u ionizirajućem plinu između radnog komada i elektrode (spojena na „+“ pol istosmjerne struje (DC)) u strujnom krugu.

Prema stupnju mehanizacije, ovaj postupak se može podijeliti na poluautomatizirano, automatizirano i robotizirano MIG/MAG zavarivanje.

Poluautomatizirani MIG/MAG postupak zavarivanja za razliku od ručnog zavarivanja, ima mehanizirani dovod žice u električni luk, a držanje i vođenje pištolja je ručno. U industriji se danas najviše primjenjuje poluautomatizirani postupak zavarivanja zbog toga jer je prilagodljiv svim uvjetima rada, te ima visoku produktivnost (2 – 3 kg/h).

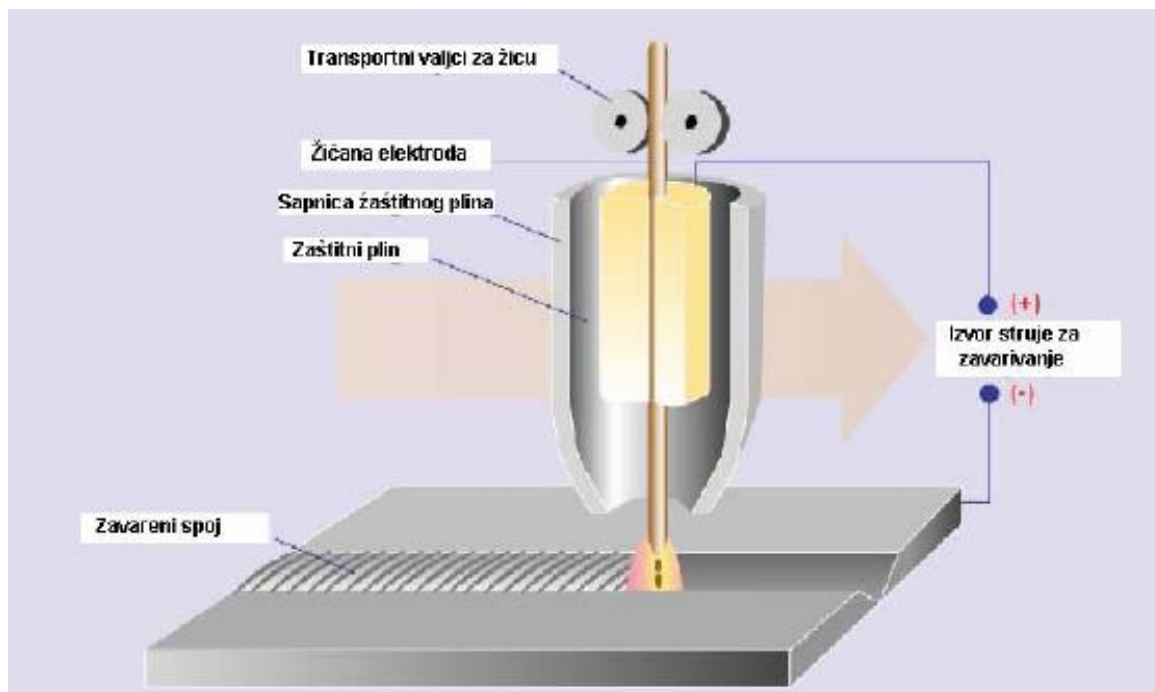
Automatizirani MIG/MAG postupak zavarivanja ima mehanizirani dovod žice u električni luk i mehanizirano vođenje pištolja. Radnik podešava parametre zavarivanja te prati proces zavarivanja. Primjenjuje se često u zavarivanju cilindričnih posuda, limova i različitih profila gdje su zavari dugački bez puno prekidanja ili u velikim serijama izrade proizvoda.

Robotizirani MIG/MAG postupak zavarivanja je programirani postupak gdje se unaprijed utvrde (programiraju) parametri, gibanje i pokretanje robotske glave u svim operacijama koje obavlja robot.

Prednosti MIG/MAG postupka zavarivanja su u tome što je primjeniv za zavarivanje svih vrsta materijala, velika je mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala, zavarivanje u svim položajima zavarivanja, mogućnost zavarivanja u zatvorenom i na otvorenom prostoru, mogućnost primjene različitih plinskih mješavina, mogućnost primjene praškom punjene žice, široki raspon debljina osnovnog materijala, velika učinkovitost i proizvodnost, pogodan je za automatizaciju, a ne isključuje se i mogućnost primjene kod lemljenja.

Nedostatak postupka je najčešće što se kod rada na otvorenom prostoru mogu pojaviti greške zbog loše zaštite, odnosno smanjenja učinkovitosti postojeće zaštite zbog strujanja zraka. Problemi se javljaju kod dovođenja dodatnog materijala (žice) što se posebice odnosi na aluminijsku žicu. Uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja, javlja se veći broj grešaka u zavarenom spoju poput naljepljivanja i poroznosti. Česta greška koja se javlja pri ovom postupku zavarivanja jest štrcanje što ima za posljedicu velike gubitke efikasnosti rada i potrebe za naknadnom obradom površine.

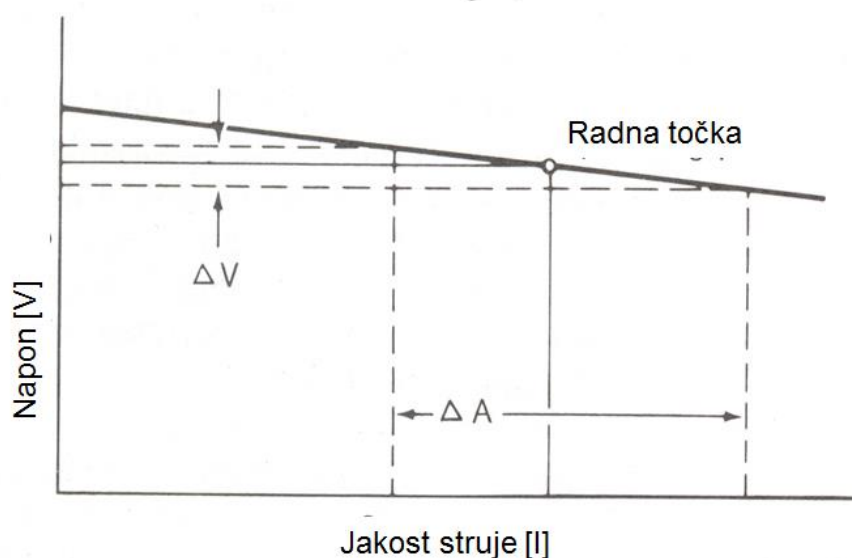
U konačnici same prednosti MIG/MAG zavarivanja su često vrlo relativne te ovise o razini složenosti objekta/proizvoda koji se zavaruje, vrsti i debljini osnovnog materijala te samim zahtjevima na kvalitetu izvedbe zavarenog spoja. Primjer mehanizma rada MAG tehnologije zavarivanja prikazan je na slici 2.



Slika 2: Princip rada zaštitnog plina pri zavarivanju [2]

1.2 Izvori struje u MAG zavarivanju

Izvori struje za MIG/MAG zavarivanje građeni su sa posebnim karakteristikama tj. ravnom ili blagopadajućom karakteristikom. Izvori struje imaju svoju statičku i dinamičku karakteristiku. Statička karakteristika izvora struje prikazana je dijagramom na slici 3. koja prikazuje odnos struje i napona u električnom luku.



Slika 3: Odnos struje i napona u električnom luku pri MAG zavarivanju [2]

Energija koja se troši u električnom luku za vrijeme zavarivanja, može se održati samo unutar određenog područja, napona luka i jakosti struje. Kod toga važnu ulogu ima dužina luka koja se za vrijeme zavarivanja mijenja. Mijenjanjem dužine luka, mijenja se napon električnog luka, a time i jakost struje zavarivanja. Kod takvih promjena, izvor svojom karakteristikom reagira na način kao što je prikazano na slici 3.

Električni luk je trajno i snažno električno pražnjenje u plinu na prostoru između vrha žice i mjesta zavarivanja, u strujnom krugu kod elektrolučnog zavarivanja. Tom prilikom se električna energija pretvara u toplinsku energiju uz vrlo visoke temperature (4000 - 7000 °C), tako da se tali metal žice i radnog komada na mjestu uspostavljanja električnog luka. Električni luk se uspostavlja, kod MIG/MAG zavarivanja, dodirom vrha žice na površinu radnog komada kada su oboje priključeni na izvor struje zavarivanja u radu. Kod ovog dodira zatvara se strujni krug i poteče struja velike jakosti kroz malu dodirnu površinu vrha žice. Uslijed otpora koji nastaje pri prolazu struje, metal se tali do djelomičnog isparavanja. Te metalne pare, zajedno sa zaštitnim plinom, uz visoku temperaturu električnog luka stvaraju uvjete za prijelaz električne struje.

Kod MAG zavarivanja postoje četiri načina prijenosa materijala u električnom luku:

- Prijenos metala kratkim spojevima,
- prijenos metala prijelaznim lukom,
- prijenos metala štrcajućim lukom,
- prijenos metala impulsom.

Više o pojedinom načinu prijenosa materijala u električnom luku biti će opisano u eksperimentalnom dijelu ovog rada gdje će se pojedini načini prijenosa materijala primijeniti pri zavarivanju jednom od dviju trokomponentnih plinskih mješavina za MAG zavarivanje općeg konstrukcijskog čelika.

1.3 Uloga zaštitnog plina pri MAG zavarivanju

Odabir zaštitnog plina za željenu primjenu je ključno za kvalitetu izvedbe zavarenog spoja jer zaštitni plin utječe, prije svega, na mehanička i metalurška svojstva zavarenog spoja. Provodi se na temelju brojnih kriterija od kojih su neki: vrsta dodatnog materijala, željena mehanička svojstva zavarenog spoja, debljina osnovnog materijala, priprema zavara, stanje osnovnog materijala (korozijska, antikorozivne prevlake, masnoće), željeni način prijenosa metala u električnom luku, položaj zavarivanja, željeni profil zavara itd. Tri su osnovna parametra za razumijevanje svojstava zaštitnih plinova: ionizacijski potencijal, toplinska vodljivost (slika 4.) i reaktivnost plina. [1]

Funkcija zaštitnog plina pri zavarivanju jest:

- zaštita procesa i rastaljenog metala od pristupa okolnog zraka,
- određivanje načina prijenosa materijala,
- definiranje oblika i strukture električnog luka,
- utjecaj na kemijski sastav zavarenog spoja,
- definiranje izgleda i geometrijskog oblika zavarenog spoja,
- utjecaj na viskozitet taline (metalne kupke),
- utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja [3].

2.3.1. Ionizacijski potencijal

Ionizacijski potencijal je energija, izražena u elektrovoltima, potrebna da se atomu plina „oduzme“ jedan elektron, a rezultat je električki nabijeni atom odnosno ion plina. Pri zadržavanju ostalih čimbenika konstantnima, ionizacijski potencijal je manji što je veća molekulska odnosno atomska masa plina. Argon, koji ima osamnaest elektrona u elektronskom omotaču, veće je atomske mase od helija koji ima dva elektrona u elektronskom omotaču. Privlačna sila koja zadržava vanjske elektrone u orbitali obrnuto je proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti od jezgre pa je energija potrebna da argon otpusti elektron znatno manja nego u slučaju helija te iznosi 15,7 eV, a kod He 24,5 eV. Pri spomenutim energetske razinama za ova dva plina, dolazi do ionizacije u prostoru električnog luka i nastaje plazma, koju čine ionizirani plin ili mješavina te metalne pare. Iako i drugi čimbenici utječu na uspostavljanje i održavanje plazme, kritične razine energije svejedno trebaju biti

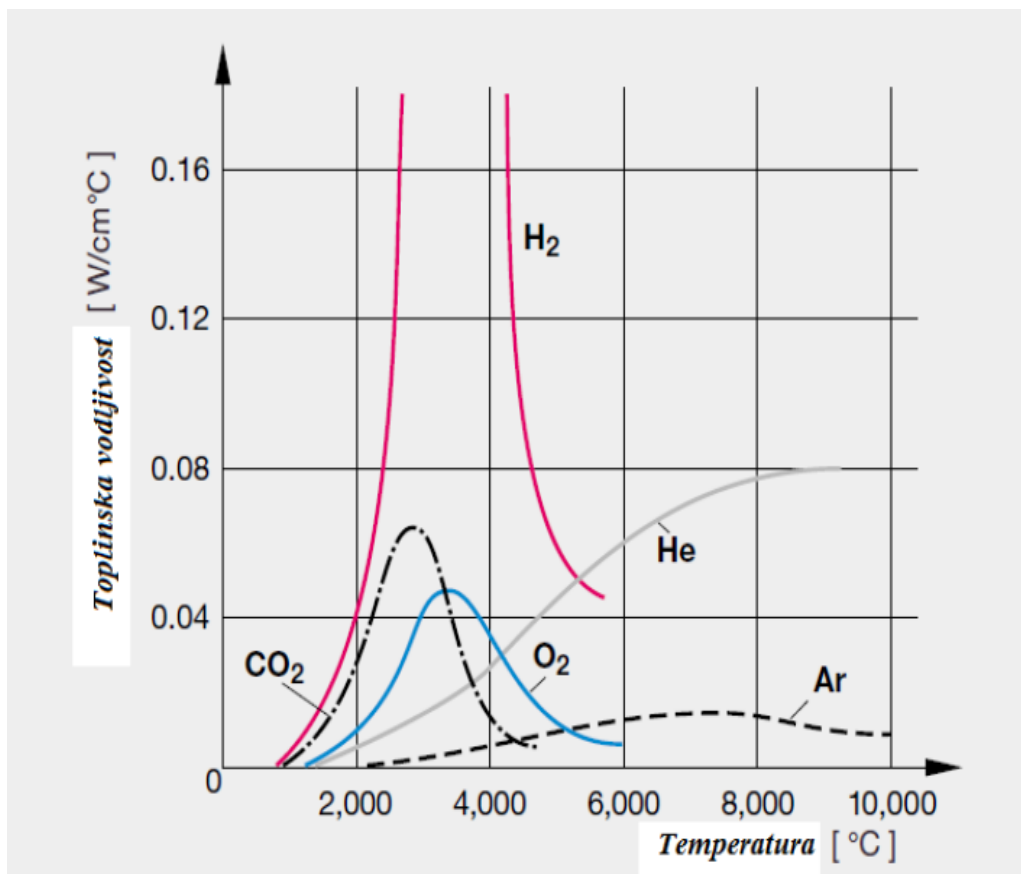
zadovoljene. U primjeni helija i helijem obogaćenih mješavina, za jednake duljine električnog luka, jakosti struje i naponi veći su nego kad se rabi argon i mješavine s većinskim udjelom argona. S obzirom da toplinu u luku, možemo izraziti kao produkt jakosti struje i napona, uporaba helija također rezultira mnogo većom raspoloživom toplinom. Uspostavljanje i održavanje električnog luka uvelike ovisi o ionizacijskom potencijalu. Zaštitni plinovi s relativno nižim vrijednostima ionizacijskog potencijala lakše oslobađaju elektrone i time se, u njihovoj primjeni, olakšava uspostavljanje električnog luka i održavanje u stabilnom radu. U tabeli 1. prikazane su vrijednosti ionizacijskog potencijala i energije disocijacije pojedinih plinova [4].

Tabela 1: Energija disocijacije i ionizacijskog potencijala plinova za zavarivanje [3]

PLIN	ENERGIJA DISOCIJACIJE [eV]	IONIZACIJSKI POTENCIJAL [eV]
VODIK	4,5	12,6
KISIK	5,1	12,6
DUŠIK	9,7	14,5
UGLJIČNI DIOKSID	5,3	14,4
HELIJ	-	26,4
ARGON	-	15,8

2.3.2. Toplinska vodljivost

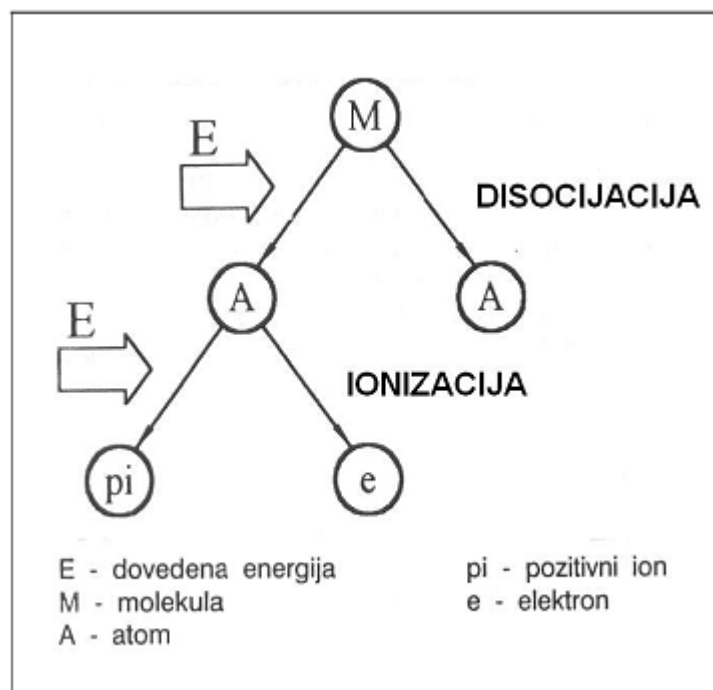
Toplinska vodljivost, je svojstvo plina vezano uz njegovu sposobnost da provodi toplinu. Utječe na širenje odnosno gubitak topline od sredine električnog luka prema periferiji. Na primjer, čisti argon, primijenjen kao zaštitni plin, ima slabu toplinsku vodljivost te utječe na uspostavljanje električnog luka koji čini dvije zone: uska, vruća jezgra i primjetno hladnija vanjska zona. Rezultat ovoga je penetracijski profil zavora sa uskim, prstolikim korijenom i širim vrhom. Plinovi s većom toplinskom vodljivošću provode više topline u vanjsku zonu pa stvaraju širi električni luk s ravnomjernijom raspodjelom temperature. Ovakva se vodljivost topline javlja kod helija, mješavina argon/vodik i argon/CO₂ te daje širi penetracijski profil na mjestu spajanja. Na slici 4. prikazan je dijagram ovisnosti toplinske vodljivosti pojedinog tehničkog plina o temperaturi.



Slika 4: Toplinska vodljivost plinova ovisno o temperaturi [3]

2.3.3. Disocijacija i rekombinacija

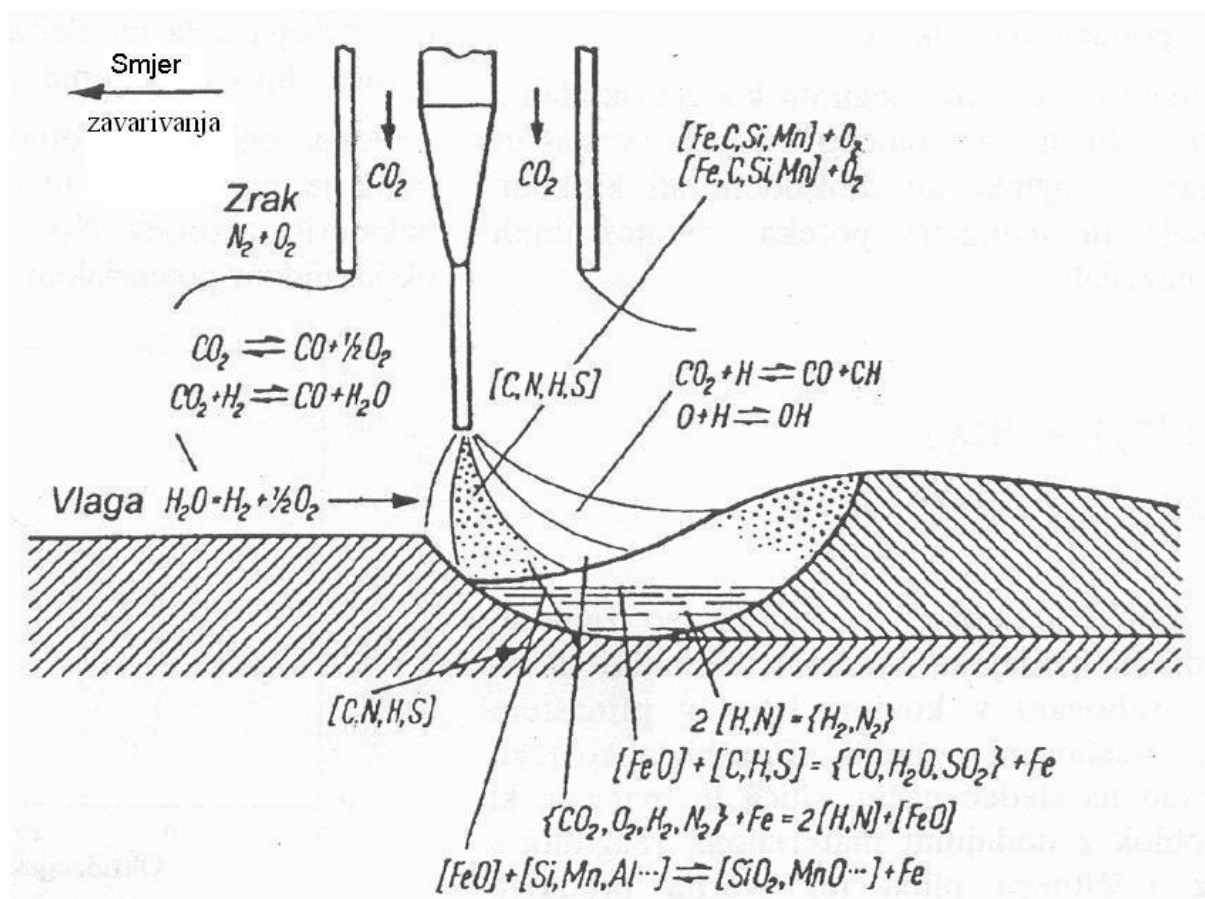
Kemijskim vezanjem dvaju ili više atoma formira se molekula. Plinovi poput CO_2 , kisika i vodika, primjerice, građeni su od molekula pa tako molekulu CO_2 sačinjavaju jedan atom ugljika i dva atoma kisika. Pri visokim temperaturama, prisutnima u plazmi električnog luka (do 10 000 K), dolazi do razlaganja odnosno disociranja navedenih plinova na atome koji se potom, barem djelomično, ioniziraju dajući elektrone, što poboljšava strujni tok. Kada disocirani plin dođe u kontakt sa površinom radnog komada, koja je relativno hladnija, atomi ulaze u rekombinaciju ponovno stvarajući molekule pri čemu se oslobađaju velike količine energije u obliku topline što utječe na intenzivnije taljenje osnovnog metala. Ipak, ovakav rasplet zbivanja ne nastupa u slučaju argona i helija kao zaštitnih plinova jer se sastoje od atoma pa ne mogu disocirati. Dakle, za istu temperaturu električnog luka, toplina generirana na radnoj površini je veća kod primjene plinova poput ugljičnog dioksida, kisika i vodika nego što je to slučaj za argon i helij. Na slici 5. prikazana je shema disocijacije i ionizacije aktivnih plinova.



Slika 5: Shematski prikaz ionizacije i disocijacije tehničkih plinova [6]

2.3.4. Kemijska reaktivnost

Kemijska reaktivnost, u kontekstu zaštitnih plinova, odnosi se na sklonost pojedinog plina da, pri temperaturama električnog luka, reagira sa elementima prisutnima u talini. Argon i helij su, primjerice, potpuno neaktivni odnosno inertni plinovi i prema tome nemaju nikakav kemijski utjecaj na zavar. Dušik je pri sobnim temperaturama također inertan, no u temperaturnim uvjetima zavarivanja postaje reaktivan i može imati nepoželjan utjecaj na kemijski sastav metala zavora. CO₂ i kisik spadaju u kategoriju reaktivnih plinova poznatu kao aktivne komponente odnosno oksidansi. Ovi plinovi reagiraju sa rastaljenim metalom u luku i u kupki stvarajući, pri tome, okside, a nerijetka posljedica reakcija su otpadni plinovi. Vodik je također reaktivan, ali je po svojoj prirodi reducens što znači da reagira s oksidacijskim sredstvima te na taj način sprječava nastajanje oksida u talini. Vodik u većim količinama postaje izuzetno štetan jer može uzrokovati pojavu hladnih pukotina, poroznosti i drugih grešaka zavarenog spoja. Na slici 6. prikazane su moguće kemijske reakcije kod MAG zavarivanja u zaštinj atmosferi ugljičnog dioksida.

Slika 6: Moguće kemijske reakcije pri MAG zavarivanju u zaštitnoj atmosferi CO_2 [7]

2.3.5. Zaštitni plinovi pri MAG zavarivanju shodno normi HR EN ISO 14175:2008

Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje su u normi HR EN ISO14175:2008 raspoređeni u slijedeće grupe prikazane u tabeli 2.

Tabela 2: Plinovi i plinske mješavine prema normi HR EN ISO 14175:2008 [3]

OZNAKA PLINSKE MJEŠAVINE PREMA HR EN ISO 14175:2008	OPIS MJEŠAVINE
R	Reducirajuće plinske mješavine
I	Inertni plinovi i inertne plinske mješavine
M	Oksidirajuće plinske mješavine na bazi argona s aktivnim plinom (CO ₂ , O ₂)
C	Visokooksidirajući plinovi i plinske mješavine
F	Nereaktivni plinovi ili reducirajuće plinske mješavine (formir plinovi)

U normi je glavna klasifikacija napravljena s obzirom na najčešće, ako ne i jedine plinove koji se trenutno koriste u zavarivanju, a to su: argon (Ar), ugljični dioksid (CO₂), vodik (H), dušik (N₂), kisik (O₂), helij (He). Također, u normi je strogo definiran način i redoslijed pisanja naziva pojedine plinske mješavine. U normi su definirani pojmovi poput klasifikacija, osnovni plin, plinska komponenta, plinske mješavine, čistoća plinova itd. Plinovi za zavarivanje moraju biti klasificirani po brojevima prema internacionalnim standardima sa pripadajućom slovnom oznakom.

Plinovi koji se koriste pri MAG zavarivanju su: ugljični dioksid (CO₂) te dvokomponentne i trokomponentne mješavine argona (Ar), ugljičnog dioksida (CO₂), kisika (O₂) i Helija (He) dok je moguća pojava vodika (H₂) i dušika (N₂) u manjim postotcima. Tabela 3. prikazuje

osnovna svojstva zaštitnih plinova koji se koriste. Tabela 4. prikazuje koji plinovi i plinske mješavine se najčešće koriste za pojedinu vrstu materijala za zavarivanje. Argon, helij i ugljični dioksid mogu se koristiti bez miješanja, dok se kisik, dušik i vodik dodaju prethodnim plinovima u određenom postotku radi povoljnijeg odvijanja fizikalno - kemijskih procesa kod zavarivanja.

Tabela 3: Osnovna svojstva zaštitnih plinova kod MAG zavarivanja prema normi HR EN ISO 14175:2008

PLIN	Kemijski simbol	Pri temperaturi od 0°C i tlaku od 1,013 bar		Ponašanje pri zavarivanju
		Gustoća (zrak = 1,293) [kg/m ³]	Točka isparavanja pri tlaku od 1,013 bara [°C]	
Argon	Ar	1,784	-185,9	inertan
Helij	He	0,178	-268,9	inertan
Ugljični dioksid	CO ₂	1,977	-78,5	oksidirajući
Kisik	O ₂	1,429	-183	oksidirajući
Dušik	N ₂	1,251	-195,8	varira ovisno o materijalu
Vodik	H ₂	0,9	-252,8	reducirajući

Argon (Ar) – najčešće korišten inertni plin. Ima nisku energiju ionizacije što za posljedicu ima profil zavora u obliku „prsta“ te lakše paljenje luka. Glavni je sastojak plinskih mješavina za MAG zavarivanje.

Helij (He) - Ima visoku toplinsku vodljivost što za posljedicu ima profil zavora koji je širi ali uz manju penetraciju.

Ugljični dioksid (CO₂) - inertan pri sobnoj temperaturi, ali u električnom luku postaje aktivan plin. Povećanjem udjela CO₂ u mješavini povećava se iznos kritične struje zavarivanja, smanjuje se stabilnost luka, povećava se štrcanje i gubitak metala. U manjem omjeru u mješavini s argonom pridonosi stabilnosti luka i smanjuje kritičnu struju zavarivanja te se postiže dobro kvašenje taline i oblik zavora u obliku „prsta“.

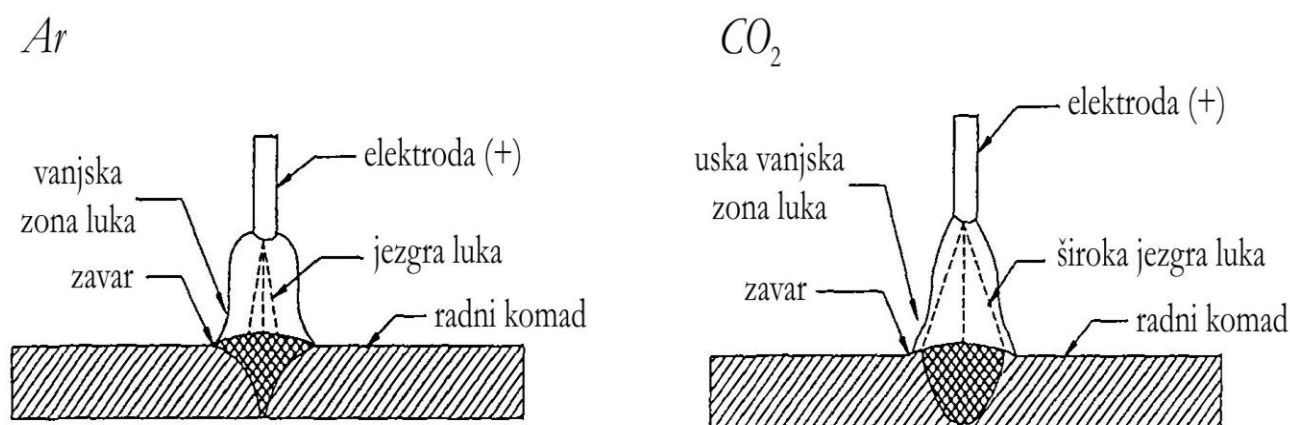
Kisik (O₂)-u malim količinama 1-5% u mješavini sa argonom pruža dobru stabilnost luka i odličan izgled zavora.

Vodik (H₂)-u malim količinama 1-5% u mješavinama s argonom služi kao zaštitni plin pri zavarivanju nehrđajućih čelika i legura nikla. Velika toplinska vodljivost rezultira poboljšanim kvašenjem i omogućuje veće brzine zavarivanja.

Tabela 4: Plinovi i plinske mješavine i njihovo područje primjene s obzirom na vrstu materijala

PLINOVI I MJESAVINE	PRIMJENA
Ar	svi metali
CO ₂	nelegirani i niskolegirani čelici
He	svi metali
Ar + He (35-75%)	svi metali, posebno Al, Cu, Ni
Ar + O ₂ (0,5%)	Al, Al-legure
Ar + O ₂ (1-2%)	visokolegirani CrNi čelici
Ar + O ₂ (3-5%)	nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + H ₂ (5-10%)	visokolegirani CrNi čelici za zavarivanje automatom
Ar + N ₂ (25-30%)	bakar i legure bakra
Ar + CO ₂ (18%)	nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ + O ₂ (93+6+1%)	nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ + O ₂ (86+12+2%)	nelegirani i niskolegirani čelici

Utjecaj zaštitnih plinova na vrstu luka, a s time u vezi i sa načinom prijenosa rastaljenog materijala u električnom luku, je značajan. Kod zavarivanja u zaštiti inertnih plinova nema načina prijenosa materijala kratkim spojevima već samo prijenos materijala štrcajućim lukom jer svojstvo plina utječe na usitnjavanje kapljica metala. Zavarivanje u zaštiti plinskih mješavina različito utječe na ponašanje električnog luka. Ako je mješavina na bazi argona i kisika onda su kapljice sitne i luk je pretežno štrcajući. Kod udjela 20 - 25% CO_2 u argonu pojačan je utjecaj CO_2 na način zavarivanja, jer CO_2 stimulira nastanak krupnih kapi rastaljenog metala te nemirnog električnog luka. Zbog toga je mješavina Ar i CO_2 sa njegovim udjelom do najviše 20% . Kisik kao treća komponenta snizuje površinsku napetost taline i usitnjava kapljicu metala pri prijenosu kroz električni luk. Utjecaj pojedinog zaštitnog plina na izgled električnog luka prikazan je na slici 7.



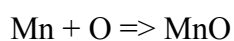
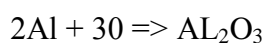
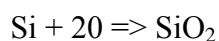
Slika 7: Utjecaj zaštitnog plina na izgled električnog luka pri MAG zavarivanju [8]

1.4 Poroznost – najučestaliji tip greške pri MAG zavarivanju

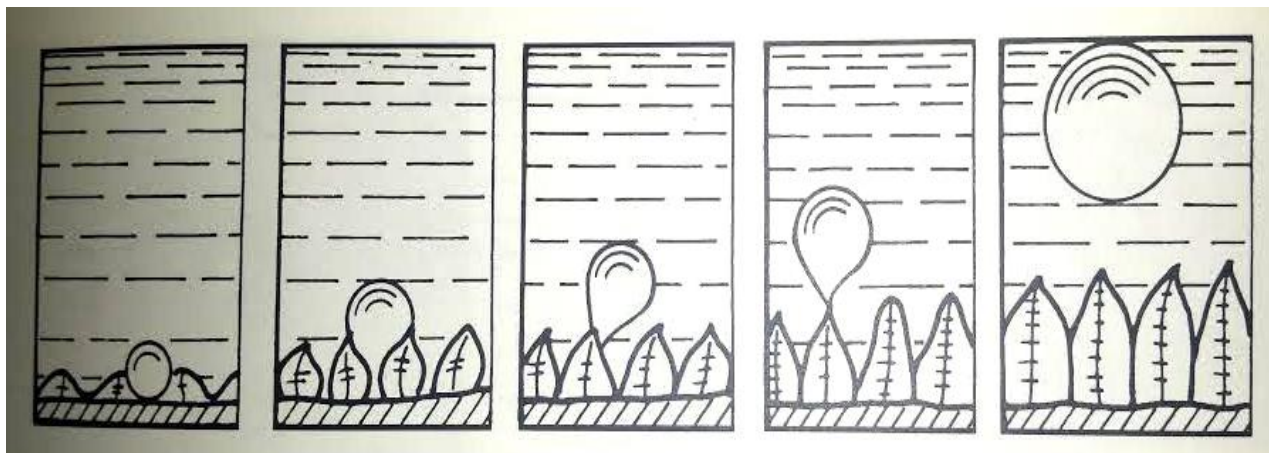
Rastaljeni metal (metalna kupka) otapa u sebi veće količine kisika, vodika i dušika, pa dolazi do međusobnih kemijskih reakcija plin - metal, koje bitno utječu na svojstva i kvalitetu zavarenog spoja. Metali već pri sobnim temperaturama sadrže male količine plinova (zaostali kisik, vodik, dušik). Dodatno, kao izvori plinova pri zavarivanju mogu se navesti nečistoće osnovnog i dodatnog materijala kao što su: ugljikovodici, oksidi, hidroksidi i drugi organski i anorganski materijali, koji se pri visokim temperaturama raspadaju i oslobađaju plinove. Također, iz atmosfere, koja okružuje rastaljene kapi i metalnu kupku utječu prisutni plinovi (kisik, vodik, dušik, ugljikov dioksid, vodena para).

Primjerice, kod zavarivanja MAG postupkom i prijelaza materijala u finim kapima u električnom luku, reakcije mogu biti vrlo snažne, unatoč vrlo kratkog vremena prijelaza kapi. Sitne kapi metala u luku zagrijanog visoko iznad tališta osnovnog i dodatnog materijala (1 800 – 2 400 °C) pružaju relativno veliku površinu za reakciju. Zbog disocijacije i ionizacije molekula plinova, atmosfera u električnom luku je vrlo aktivna. Čak i dušik, koji se smatra neutralnim, pri visokim temperaturama u električnom luku postaje vrlo aktivan. U električnom luku temperatura plinova doseže lokalno od 5 000 do 15 000 °C, pa se molekularni plinovi raspadaju u atome, a djelomično i u ione. Kod MAG zavarivanja kratkim električnim lukom postoji manja mogućnost reakcije plina s metalom, jer metal prelazi u grubim kapima, koje imaju manju površinu izloženu okolnoj atmosferi i kapi ne "lete" slobodno kroz plazmu luka, gdje bi se zagrijale na visoke temperature. Temperatura ovih relativno velikih kapi je samo oko 100 °C iznad tališta. Kod zavarivanja pod zaštitnim praškom dolazi do stvaranja zaštitnog sloja troske između rastaljenog metala i atmosfere, pa su moguće reakcije s plinovima minimalne [9].

Kisik je uvijek, u većoj ili manjoj količini, prisutan u rastaljenom metalu, te se mora spriječiti njegova reakcija sa ugljikom iz cementita (Fe_3C), jer može uzrokovati poroznost i razugličenje: $\text{C} + \text{O} \Rightarrow \text{CO}$ (plinski mjehurići, poroznost). Dodajući u oblogu elektrode ili u žicu za zavarivanje elemente, koji imaju veliki afinitet prema kisiku: aluminij, silicij, mangan, titan i cirkonij, dolazi do kemijskih reakcija:

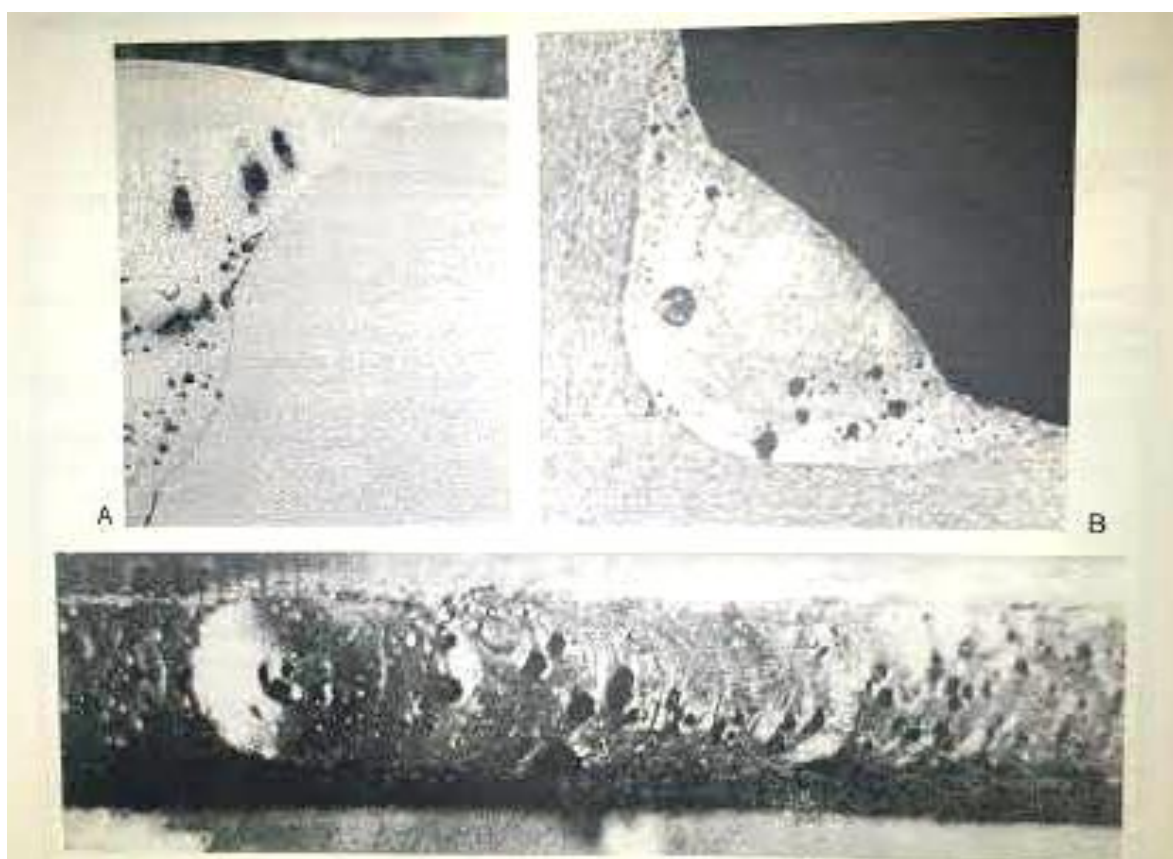


Poroznost u metalu zavara su mjesta ispunjena stlačenim plinom. Različitih su veličina, od vrlo sitnih, okom nevidljivih, pa do veličina od nekoliko milimetara. Nastajanje poroznosti u zavaru tumači se time što metal zavara u rastaljenom stanju može upiti znatne količine plinova. Vodik i dušik upija se izravno, a kisik u spoju s ugljikom (ugljični monoksid). Ohlađivanjem taline plinovi naglo izranjaju iz metala u obliku mjehurića. Shematski prikaz otplinjavanja mjehurića plina iz taline tijekom skrućivanja metala zavara prikazan je na slici 8.



Slika 8: Shematski prikaz otplinjavanja mjehurića plina iz metala zavara [10]

Ako je brzina izlučivanja plinova manja od brzine skrućivanja metala, plinovi ostaju zarobljeni u zavaru. Izlazeći iz zavara, plinski mjehurići ponekad ostavljaju vidljive šupljine na površini zavara. Veličine i oblici šupljih mjesta (pora) ovise o količini upijenog, odnosno izlazećeg plina iz taline metala zavara i brzine skrućivanja. Štetni plinovi (kisik, vodik, dušik) ulaze u talinu iz električnog luka. U električni luk dolaze iz okolne atmosfere, iz vlage i drugih nečistoća što se nalaze na dodatnom materijalu i na površini osnovnog materijala na mjestu zavarivanja, razlaganjem spojeva pod utjecajem visokih temperatura. Ugljični monoksid nastaje kao reakcija nepotpune dezoksidacije taline zavara, tako da se ostatak kisika veže s ugljikom u ugljični monoksid. Primjer grešaka poroznosti nastalih pri MAG zavarivanju prikazane su na slici 9 [10].



Slika 9: Primjeri grešaka poroznosti nastalih pri MAG zavarivanju [10]

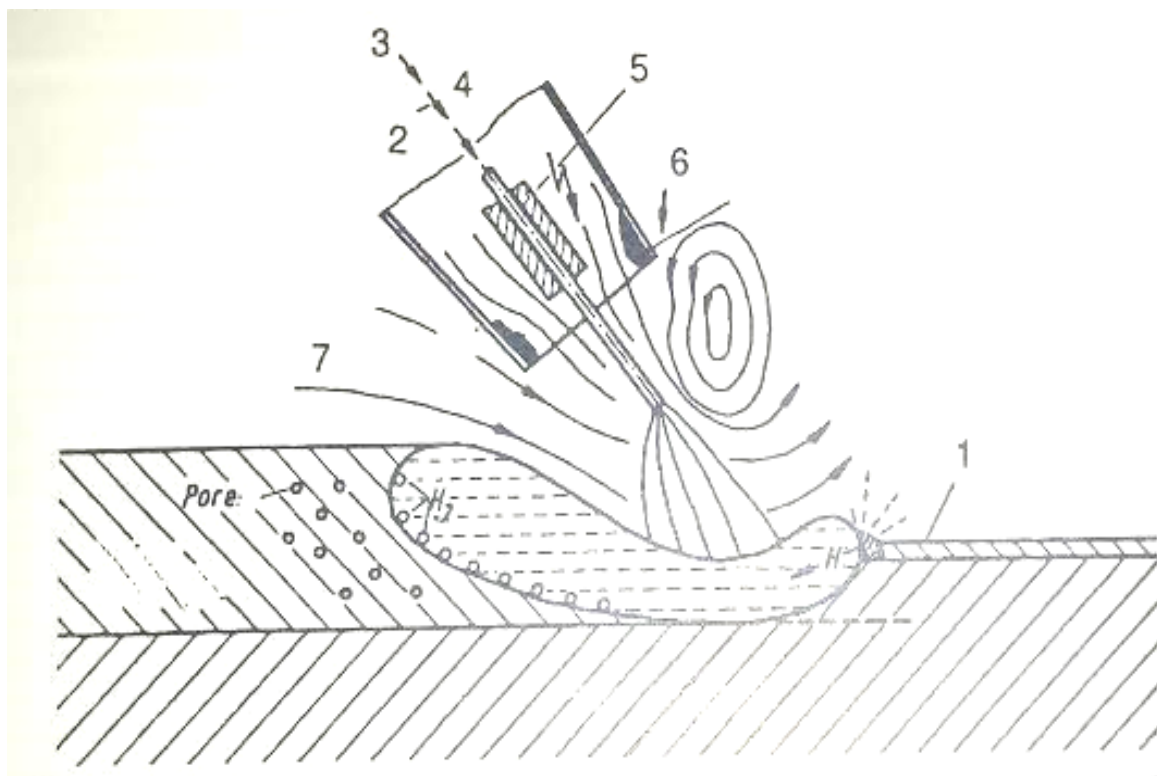
2.4.1. Primjeri uzroka i izbjegavanje nastajanja poroznosti

Uzroci poroznosti u zavaru su:

- nečistoće i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnim materijalima,
- slaba zaštita procesa zavarivanja,
- neispravni parametri i tehnika rada u zavarivanju.

Nečistoće su najčešće hrđa i okujina, čestice oksida ili odvojene čestice od brušenja u žlijebu. Masnoće dopijevaju na površinu žlijeba najčešće pri obradi žlijeba poput strojne obrade, brušenja zamašćenim stlačenim zrakom i sl. Vlaga je prisutna najčešće u oblozi elektrode, prašku i u zaštitnom plinu, ali i na površini mjesta zavarivanja, naročito kod zavarivanja po hladnijem vremenu. Predug električni luk (previsoki napon) slabi zaštitu taline i kapljice metala u prolazu kroz luk. Nepravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka česti je uzročnik poroznosti u zavaru. U trenutku kada se vrh elektrode dotakne s materijalom koji se zavaruje i zatim odmakne radi uspostavljanja luka, ulaze štetni plinovi iz okolne atmosfere i zatim bivaju upijeni u talinu. To se događa i kod nepravilnog prekidanja električnog luka, odmicanjem elektrode. Mjesta početaka i završetaka obično su sklona pojavi plinskih mjehurića. Pojava poroznosti u zavaru najčešća je kod MAG postupka zavarivanja. Previše nagnut pištolj izaziva iza sebe uvlačenje štetnih plinova. Prevelika količina zaštitnog plina uzrokuje prejaka strujanja i vrtloženja plina, pa dolazi do povlačenja štetnih plinova iz okoliša. Premala količina plina slabo zaštićuje talinu. Nečista sapnica remeti mirno strujanje plina, stvara vrtloženje, što dodatno slabi zaštitu taline. Nedovoljno zadržavanje pištolja na završnom krateru, slabi zaštitu. Dovod plina može biti nemiran i zbog pregrijane sapnice. Poroznosti mogu nastati i uslijed nepravilnog kemijskog sastava plina i vlage u plinu. Česti uzroci poroznosti su i neispravan uređaj: propuštanje vode na pištolju, uvlačenje zraka na sustavu za dovod plina ili neispravan regulacijski ventil koji ne propušta dovoljnu količinu plina.

Poroznost u zavaru uzrokuje i „puhanje“ luka, pregrijana talina, nepravilno izvedeni pripoji, nečista ili nedovoljno priljubljena podloška u korijenu zavara, nečistoće u osnovnom materijalu, osnovni materijal s visokim sadržajem ugljika. Shematski prikaz uzroka nastajanja poroznosti u zavarenom spoju kod MAG zavarivanja prikazan je na slici 10. [10]



Slika 10: Shematski prikaz uzroka nastajanja poroznosti pri MAG zavarivanju

Na slici 10. prikazano je:

- 1– nečistoće na mjestu zavarivanja (hrđa, masnoća, vlaga i dr.),
- 2– nečista površina žice,
- 3– nejednolik dovod žice,
- 4 – vlaga u zaštitnom plinu,
- 5 – slab prijenos električne struje,
- 6 – nečista sapnica izaziva vrtloženje zaštitnog plina, te ulazak zraka u zaštitni plin,
- 7 – prevelik nagib pištolja za zavarivanje pa strujanje plina privlači („injektira“) zrak u talinu.

Iz primjera uzroka pojave poroznosti proizlaze jasna pravila za izbjegavanje njihova nastajanja:

- besprijeckorna čistoća mjesta zavarivanja, naročito kod visokih zahtjeva za kvalitetu zavarenih spojeva,
- odmašćivanje spoja neposredno prije zavarivanja nehrđajućih čelika,
- uklanjanje oksida neposredno prije zavarivanja aluminija i aluminjskih legura,
- za hladnijeg vremena plinskim plamenom osušiti spoj prije zavarivanja,
- pravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka,
- pravilno održavanje dužine električnog luka,
- ispravan napon – pravilan nagib pištolja ili elektrode,
- ispravna količina zaštitnog plina (ni premala ni prevelika),
- odgovarajuća čistoća zaštitnog plina,
- ispravan uređaj za zavarivanje,
- ispravni parametri zavarivanja,
- ispravna tehnika rada.

1.5 PLINSKE MJEŠAVINE U MAG ZAVARIVANJU

1.5.1 Dvokomponentne plinske mješavine

U praksi se najčešće koriste dvokomponentne i trokomponentne plinske mješavine. Kombinacijom, u prethodnom odlomku, navedenih plinova i njihovih svojstava dobiva se, ovisno o željenoj primjeni, plinska mješavina boljih i za proces pogodnijih svojstava.

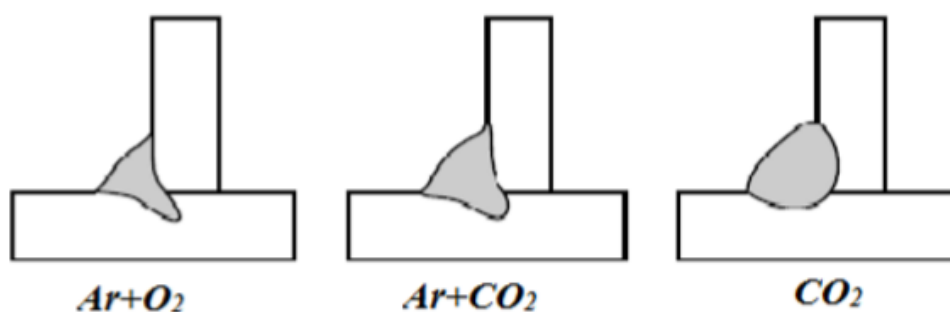
Najčešće korištene dvokomponentne mješavine plinova koje se koriste pri MAG zavarivanju su na osnovi argona i CO₂ te argona i kisika dok se od trokomponentnih najčešće koristi plinska mješavina helija, argona i CO₂, a pojavljuje se još i trokomponentna mješavina argona, CO₂ i kisika. [1] Slika 11. prikazuje podjelu zaštitnih plinova za MAG zavarivanje prema normi EN ISO 14175:2008.

Grupa prema HR EN ISO 14175	Oznaka	Komponente vol. [%]				
		CO ₂	O ₂	H ₂	Ar	
M1	1	> 0 do 5	-	> 0 do 5		visokolegirani čelici
	2	> 0 do 5	-	-	ostatak	
	3	-	> 0 do 3	-	ostatak	
	4	> 0 do 5	> 0 do 3	-	ostatak	
M2	1	> 5 do 25	-	-	ostatak	nelegirani čelici
	2	-	> 3 do 10	-	ostatak	
	3	> 0 do 5	> 3 do 10	-	ostatak	
	4	> 5 do 25	> 0 do 8	-	ostatak	
M3	1	> 25 do 50	-	-	ostatak	
	2	-	> 10 do 15	-	ostatak	
	3	> 5 do 50	> 8 do 15	-	ostatak	
C	1	100	-	-	-	

M: mješavina plina, C: ugljični dioksid/CO₂

Slika 11: Podjela zaštitnih plinskih mješavina pri MAG zavarivanju shodno normi EN ISO 14175:2008

Ar - CO₂ su najčešće primjenjivane dvokomponentne plinske mješavine. Podržavaju sva četiri načina prijenosa materijala u električnom luku. Disociranjem CO₂ u električnom luku oslobađa se kisik koji daje talini dodatnu viskoznost i doprinosi stabilizaciji električnog luka. Svojom toplinskom vodljivošću, CO₂ također utječe na veću širinu provara. Štrcajući prijenos materijala u električnom luku zahtijeva da količina CO₂ bude manja od 18%. Porastom njegova udjela raste unos topline a time i opasnost od izgaranja. Ar - CO₂ mješavine do 18% CO₂ podržavaju također i impulsni način prijenosa materijala. Prijenos materijala kratkim spojevima je način prijenosa s prilično niskim unosom topline, te se za nju koriste mješavine s udjelom CO₂ jednakim ili većim od 20%. Kod primjene kratkih spojeva zahtijeva se opreznost ukoliko se upotrebljavaju veće količine argona. Slika 12. pokazuje razlike u penetraciji kod dvokomponentnih plinskih mješavina u odnosu na čisti CO₂ dok tabela 5. daje uvid u njihova svojstva.



Slika 12: Razlike u penetraciji kod dvokomponentnih plinskih mješavina u odnosu na čisti CO₂ [11]

Tabela 5: Svojstva dvokomponentnih plinskih mješavina u odnosu na čisti CO₂

SVOJSTVA		Ar/ CO ₂	Ar/ O ₂	CO ₂
Penetracija	položeno zavarivanje (PA)	dobra	dobra	dobra
	prisilni položaji (PF, PG, PE...)	povećanjem volumnog udjela CO ₂ se povećava	upitna je ukoliko ako talina prethodi električnom luku	pouzdana
Toplinsko opterećenje elektrode		snižava se povećanjem razine CO ₂	visoko; prekomjerna temperatura u električnom luku ograničava parametre	nisko zbog visoke toplinske vodljivosti plina
Stupanj oksidacije		viši s povećanjem razine CO ₂	visok; npr. pri 8% O ₂	visok
Poroznost		niža s povećanjem razine CO ₂	visoki udio pora	niska mogućnost nastanka pora
Prskanje		više s povećanjem razine CO ₂	nisko	najveće; povećava se povećanjem parametara
Unos topline		povećava s povećanjem razine CO ₂	najniži	visok
Način prijenosa metala u električnom luku	kratkim spojevima	da	da	da
	prijelaznim lukom	da	da	-
	štrcajući luk	da	da	-
	impulsni luk	da (do 20% CO ₂)	da	-

98% Ar + 2% CO₂ – najviše se koristi za prijenos materijala u štrcajućem te impulsnom električnom luku pri zavarivanju nelegiranih čelika. Koristi se i kod zavarivanja tankih limova velikim brzinama. Glavne karakteristike ove kombinacije jesu dobra viskoznost taline te postizanje velikih brzina zavarivanja.

95% Ar + 5% CO₂ – upotrebljava se za prijenos materijala impulsnim električnim lukom. Dodatak od 5% CO₂ utječe na bolje razlijevanje taline. Više se primjenjuje kod debljih radnih komada.

90% Ar + 10% CO₂ – koristi se za način prijenosa materijala u štrcajućem i impulsnom električnom luku. Penetracija u osnovni materijal je šira, smanjuje se dubina prstolikog profila.

82% Ar + 18% CO₂ – predstavlja gornju granicu kad je riječ o primjeni metode prijenosa materijalu u štrcajućem električnom luku. Ova mješavina se najviše koristi u Europi za zavarivanje materijala različitih debljina stijenki. Široki električni luk rezultira kvalitetnijim penetracijskim profilom na mjestu zavarenog spoja. Primjenjuje se i kod zavarivanja kratkim spojevima i kod npr. MAG inačice zavarivanja, *STT* (eng. Surface Tension Transfer) tehnologije zavarivanja.

80% Ar + 20% CO₂ – mješavina koja se često koristi, dodatno smanjuje prskanje taline i doprinosi kvalitetnijem izgledu zavarenog spoja. Ponajviše se koristi kod prijenosa materijala u kratkim spojevima.

Dodavanjem kisika argonu, prije svega, poboljšavaju se karakteristike električnog luka te povećava viskoznost taline zahvaljujući smanjenu površinske napetosti taline. Nadalje, kisik povećava oksidacijski potencijal luka, povećava unos topline, brzinu zavarivanja, stabilizira električni luk, kapljice pri prijenosu metala štrcajućim lukom su manje, ali brže se stvaraju, kisik također smanjuje prijelaznu jakost struje (kritičnu struju) kod prijenosa materijala slobodnim letom kapljica i utječe na oblik zavarenog spoja. Uporaba ovih mješavina pokazala se vrlo korisnom pri brzom zavarivanju tankostijenih materijala. Ove mješavine se najčešće koriste kod zavarivanja ugljičnih i korozijski postojanih čelika.

98%Ar + 2% O₂ – koristi se kao zaštitna mješavina kod zavarivanja ugljičnih (niskolegiranih) i korozijski postojanih čelika. U prošlosti su prve primjene argon - O₂ zaštitne atmosfere kod štrcajućeg prijenosa materijala, sadržavale upravo 2% O₂. Obično se upotrebljava za zavarivanje tankih limova, velikim brzinama. Uz štrcajući, podržava i prijenos materijala u

impulsnom električnom luku. Ova mješavina se često primjenjuje kad se zahtijevaju pouzdana mehanička svojstva pri uporabi dodatnog materijala od niskolegiranih ugljičnih čelika.

95% Ar + 5% O₂ – najčešće upotrebljavana zašitna mješavina za opće konstrukcijske čelike. Podržava prijenos metala štrcajućim lukom i impulsnim strujama. U odnosu na prethodnu smjesu dodatno povećava viskoznost taline i omogućava lakšu kontrolu. Pri uporabi ove mješavine, obično se od osnovnog materijala zahtijeva da ne sadrži uključke i da ima što manje nečistoća (plemeniti čelici).

Ar + (8 – 12)% O₂ – ove mješavine su se najprije počele koristiti u Njemačkoj, a potom u SAD – u. Glavna primjena ovih mješavina je kod zavarivanja s jednim prolazom, iako su zabilježeni i slučajevi višeslojnog zavarivanja u zašitnoj atmosferi ovih mješavina. Kod odabira dodatnog materijala potrebno je uzeti u obzir visoki oksidacijski potencijal ovih smjesa plinova, te se iz tog razloga nerijetko koriste žice s dodanim dezoksidantima. Veća viskoznost taline i niža vrijednost kritične struje u području štrcajućeg luka, mogu biti od velike koristi za određene primjene. U tabeli 6. prikazane su uobičajene plinske dvokomponentne mješavine sa odgovarajućim svojstvima pri pojedinim oblicima prijenosa materijala u električnom luku [12].

Tabela 6: Uobičajene dvokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [13]

Redni broj	Plinska mješavina	Način prijenosa materijala u električnom luku	Svojstva
1.	98 %Ar + 2% CO ₂	štrcajući luk	velika brzina zavarivanja; za uporabu sa elektrodama od ugljičnog i nehrđajućeg čelika
2.	95 %Ar + 5% CO ₂	štrcajući luk	impulsni luk sa elektrodama od ugljičnog čelika
3.	90 %Ar + 10% CO ₂	štrcajući luk	za prijenos metala štrcajućim i impulsnim lukom kod ugljičnih čelika
4.	82 %Ar + 18% CO ₂	štrcajući luk	popularna mješavina u Europi za zavarivanje širokog spektra debljine osnovnog materijala
5.	80 %Ar + 20% CO ₂	kratki spojevi	još veće smanjenje prskanja taline pri zavarivanju

1.5.2 Trokomponentne plinske mješavine

Trokomponentne plinske mješavine primjenjuju se pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika, te u nekim slučajevima legura nikla. Za prijenos materijala kratkim spojevima na ugljičnom čeliku, dodatak od 40 % helija u mješavinu argona i CO₂ dovodi do šireg profila zava. Helij omogućuje veću toplinsku vodljivost za prijenos materijala kratkim spojevima pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika. Primjena ovih mješavina je česta kod zavarivanja nehrđajućih čelika.

Kod korozijski postojanih čelika, primjena trokomponentnih mješavina je svakodnevna pojava. Udjeli helija od 55 do 90 % i 2,5 % CO₂ dodaju se argonu za prijenos materijala kratkim spojevima. Prednosti ovih mješavina su:

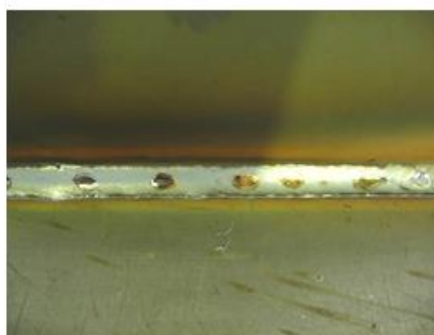
- smanjeno prskanje,
- poboljšana viskoznost taline,
- ravni i položeniji izgled zava,
- stabilniji električni luk [14].

Argon sa udjelom od 5 - 10% CO₂ i sa 1 - 6% O₂ uglavnom služi za zavarivanje ugljičnih, niskolegiranih čelika različitih debljina. Ove plinske mješavine primjenjuju se kada se traže dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva spomenutih vrsta osnovnog materijala. Na tankostijenim radnim komadima, udio kisika poboljšava stabilnost luka i smanjuje potrebnu jakost struje na 30 do 60 A, što omogućuje kratki i lako upravljivi električni luk i doprinosi smanjenju prekomjernog protaljivanja i izobličenja zbog smanjenog unosa topline u području zava. Trokomponentne Ar - CO₂ - O₂ mješavine podržavaju prijenos materijala kratkim spojevima, štrcajućim lukom te impulsnim strujama za primjene na legiranim i niskolegiranim čelicima. Prikaz uobičajenih trokomponentnih plinskih mješavina prikazan je u tabeli 7.

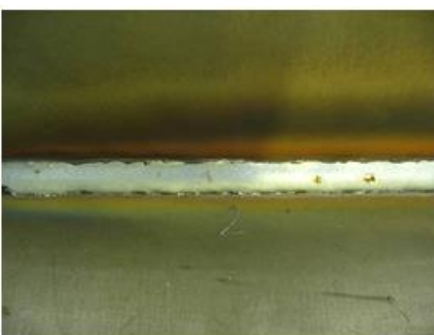
Tabela 7: Uobičajene trokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [13]

Redni broj	Plinska mješavina	Način prijenosa materijala u električnom luku	Svojstva
1.	90% He + 7,5% Ar + 2,5% CO ₂	kratkim spojevima; impulsnim lukom	najpopularniji za zavarivanje čelika kratkim spojevima; služi za zavarivanje osnovnog materijala debljeg od 1,6 mm od nehrđajućeg čelika i nikla impulsnim lukom; velike brzine pri zavarivanju nehrđajućeg čelika
2.	55% He + 42, 5% Ar + 2,5% CO ₂	impulsni luk	mogućnost primjene pri zavarivanju nehrđajućih čelika i nikla kratkim spojevima; niži udio He omogućava mu primjenu i kod štrcajućeg luka
3.	38% He + 56% Ar + 6% CO ₂	kratkim spojevima	uporaba na ugljičnom čeliku i na niskolegiranim čelicima
4.	90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	kratkim spojevima; štrcajućim lukom; impulsnim lukom	za zavarivanje ugljičnih čelika; visok udio inertne komponente smanjuje prskanje

Primjer rezultata zavarivanja trokomponentnom plinskom mješavinom sa 93% argona + 6% CO₂ + 1% O₂ (*Ferroline C6 X1*) prikazan je na slici 13A uz odgovarajuće parametre zavarivanja dobivene prilikom primjene te trokomponentne plinske mješavine. Još jedan takav primjer prikazan je na slici 13B sa trokomponentnom plinskom mješavinom sa 90% Ar + 12% CO₂ + 2% O₂ (*Ferroline C12 X2*).



- Struja zavarivanja: 260 A
- Napon: 32,0 V
- Brzina žice: 13,0 m/min
- Brzina zavarivanja: 32,0 cm/min
- Unos topline: 8,30 kW

A

- Struja zavarivanja: 260 A
- napon: 29,9 V
- Brzina žice: 13,0 m/min
- Brzina zavarivanja: 32,0 cm/min
- Unos topline: 7,77 kW

B

Slika 13: Rezultat zavarivanja trokomponentnim plinskim mješavinama: A – *Ferroline C12 X2*, B – *Ferroline C6 X1* [14]

2 EKSPERIMENTALNI DIO

Osnovni cilj istraživanja različitih plinskih mješavina kod MAG zavarivanja, jest pronaći optimalnu zaštitu taline pri zavarivanju materijala različitih kvaliteta površina, u različitim položajima zavarivanja, parametrima te naposljetku i različitim proizvodnim uvjetima. U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada odabrane su dvije vrste različitih trokomponentnih aktivnih plinskih mješavina:

- Ferroline C6 X1 (93% Ar – 1% O₂ – 6% CO₂),
- Ferroline C12 X2 (86% Ar – 2% O₂ – 12% CO₂).

Plinske trokomponentne mješavine namijenjene su zavarivanju općeg konstrukcijskog čelika. Navedene mješavine ispitat će se pri zavarivanju limova općeg konstrukcijskog čelika:

- različitih debljina limova,
- različitih površinskih stanja (hrđa, okujina, sačmarena površina, temeljni premaz),
- različitih postupaka MAG zavarivanja (ručno i automatsko MAG zavarivanje),
- različitim načinima prijenosa materijala u električnom luku.

2.1 Materijali i metode za prvi dio eksperimenta

2.1.1 Osnovni materijal

U prvom planu pokusa kao osnovni materijal za zavarivanje korišten je opći konstrukcijski čelik kvalitete S235 J2 GR čiji je kemijski sastav prikazan u tabeli 8.

Tabela 8: Kemijski sastav osnovnog materijala [15]

Maseni udio, [%]				
C	Mn	P	S	Si
0,22	1,60	0,05	0,05	0,05

Dimenzija limova od spomenutog osnovnog materijala je 300 x 150 x 10 mm, a površinsko stanje limova bilo je različito pripremljeno; Naime od ukupno 16 komada narezanih ploča, po četiri komada ploča bile su površinski pripremljene na jednak način, s ciljem da se ista stanja površine podvrgnu zavarivanju različitim trokomponentnim plinskim mješavinama pri impulsnom načinu prijenosa materijala u električnom luku. Plan pokusa za prvi dio eksperimenta MAG zavarivanja trokomponentnim plinskim mješavinama prikazan je u tabeli 9. gdje je:

- A – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6 X1*,
- B – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C12 X2*,
- 1A – 4A – uzorci različitih vrsta površinskog stanja osnovnog materijala koji će se zavariti trokomponentnom mješavinom *Ferroline C6 X1*,
- 1B – 4B – uzorci različitih vrsta površinskog stanja osnovnog materijala koji će se zavariti trokomponentnom mješavinom *Ferroline C12 X2*.

Svi uzorci zavareni su, po normi HRN EN ISO 6947:2011, u PB položaju zavarivanja, lijevom tehnikom zavarivanja.

Tabela 9: Plan pokusa za prvi dio eksperimenta zavarivanja trokomponentnim plinskim mješavinama

Redni broj	Vrsta plinske mješavine	A	B
	Površinsko stanje		
1.	temeljni premaz (EMC 182 K-DB Weiss)	1A	1B
2.	sačmarena površina	2A	2B
3.	sačmarena površina sa naknadno izazvanom hrđom osnovnog materijala	3A	3B
4.	nesačmarena površina sa okujinom	4A	4B

2.1.2 Prijenos metala u impulsnom električnom luku

Prijenos metala impulsnim električnim lukom (*eng.* Pulsed Spray Transfer) je visoko kontrolirana verzija štrcajućeg luka. Izvori struje generiraju promjenjiv oblik struje (mijenja se od vršne vrijednosti do vrijednosti osnovne struje) tj. impuls. Kad je iznos struje maksimalan tj. kad dosegne vršnu vrijednost impulsne struje, jedna kapljica se odvaja i putuje slobodnim padom duž električnog luka. Nakon toga vrijednost struje pada na osnovnu vrijednost koja osigurava stabilnost električnog luka i srednju vrijednost unosa topline. Frekvencija impulsnog zavarivanja proporcionalno raste s brzinom dovođenja žice. Kombinacijom ta dva parametra regulira se srednja struja zavarivanja koja omogućuje zavarivanje širokog spektra debljina osnovnog materijala impulsnim lukom. Elektrode koje se koriste pri ovom načinu prijenosa materijala su:

- pune elektrode (\varnothing 0,8 – 1,6 mm),
- praškom punjene elektrode (\varnothing 1, 1 – 2, 0 mm).

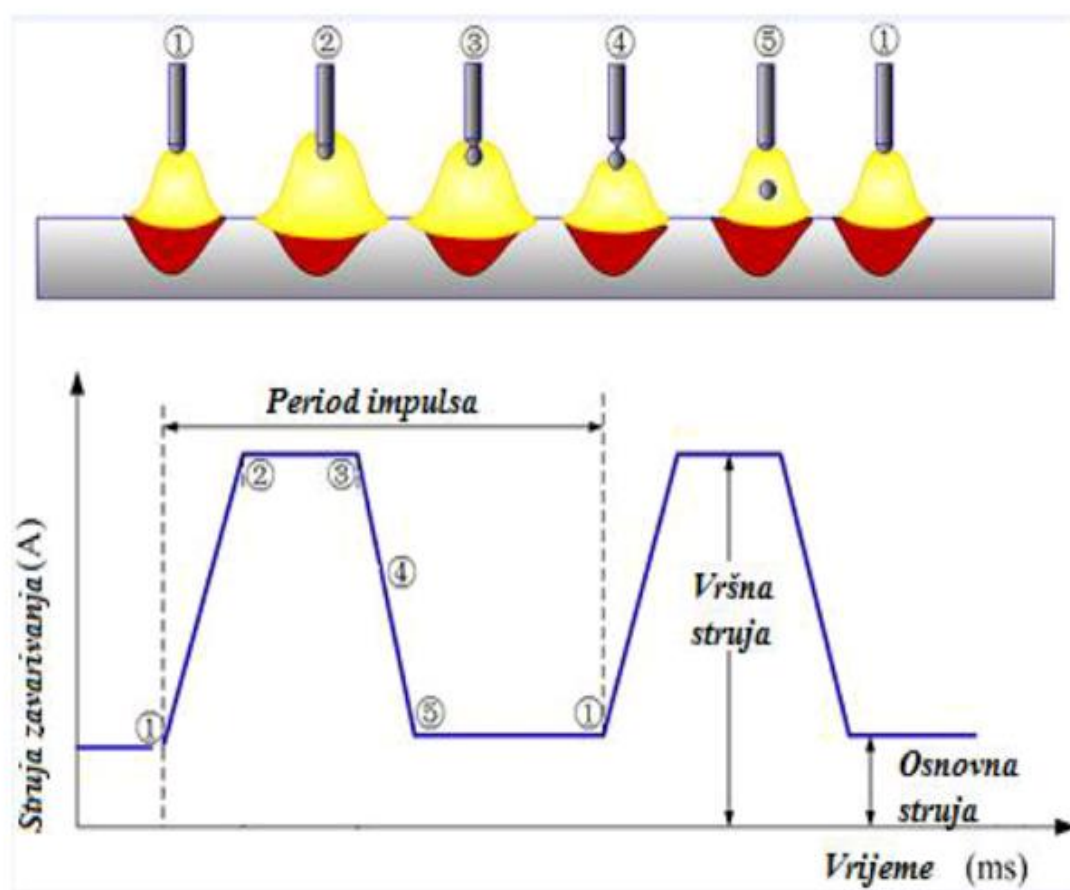
Ovaj način prijenosa postiže se samo plinskim mješavinama bogatima argonom, dok se kod ugljičnih čelika mogu koristiti plinske mješavine s maksimalno 18% CO₂. Prednosti ovoga načina prijenosa materijala u električnom luku su:

- smanjeno prskanje taline,
- smanjenje toplinskih deformacija uslijed manjeg unosa topline,
- mogućnost automatizacije postupka,
- mogućnost postizanja velikih brzina zavarivanja,
- velika iskoristivost dodatnog materijala.

Nedostaci su:

- skuplja oprema negoli kod drugih načina prijenosa materijala u električnom luku,
- zaštitne plinske mješavine su skuplje,
- dodatna zaštita zavarivača zbog veće energije električnog luka [16].

Kvalitativni prikaz izmjene vršne i osnovne vrijednosti struje prikazan je na slici 14.



Slika 14: Kvalitativni prikaz impulsnog zavarivanja [16]

2.1.3 Dodatni materijal

U ovom eksperimentu koristio se dodatni materijal u obliku pune elektrode promjera 1,2 mm, proizvođača Elektroda Zagreb d.d. Specifikacija dodatnog materijala prikazana je na slici 15.

EZ - SG 2

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO₂ ili mješavine plinova Ar/CO₂. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstruktivski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Katlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelčni ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R _{HL} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

C	Mn	Si	Cu
% 0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)

5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)

15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)

250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV

= +

Slika 15: Mehanička svojstva i karakteristike dodatnog materijala za zavarivanje u prvom dijelu eksperimenta

2.1.4 Uređaj za zavarivanje

U prvom dijelu eksperimenta korišten je uređaj za zavarivanje marke Fronius, model TPS 5000 (*eng.* Trans Pulsed Synergic). Uređaj je u potpunosti digitaliziran te posjeduje mikroprocesorsko upravljanje za sve konvencionalne načine prijenosa materijala u električnom luku pri MAG zavarivanju. Izlazna struja uređaja iznosi 500 A, a može se koristiti i kao izvor struje za TIG i REL zavarivanje. Uređaj je prikazan na slici 16.



Slika 16: Trans Pulsed Synergic uređaj za MIG/MAG zavarivanje

2.1.5 Rezultati i rasprava prvog dijela eksperimenta

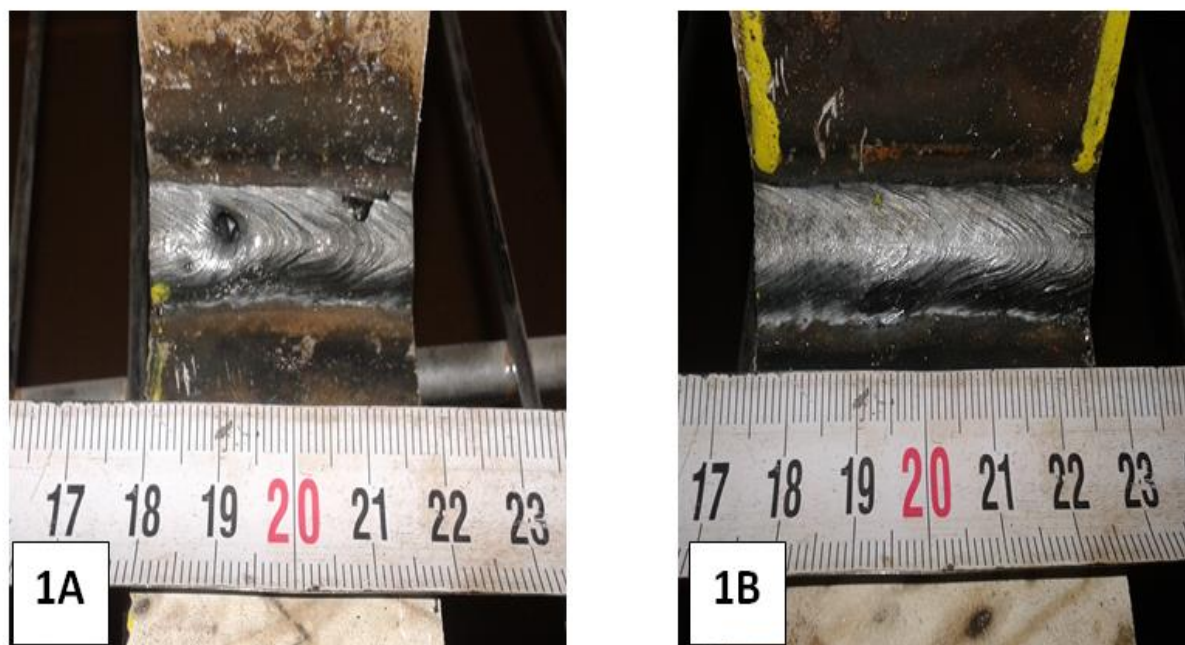
U prvom dijelu eksperimenta pratilo se zavarivanje četiri različitih kvaliteta površine lima zavarenih sa dvije različite trokomponentne plinske mješavine. Rezultati zavarivanja za pojedinu kvalitetu površine, sa pripadajućim parametrima i fotografijama prikazani su u daljnjem tekstu. Praćeni parametri bili su:

- struja zavarivanja [A],
- napon [U],
- brzina žice [m/min],
- vrijeme zavarivanja [s],
- brzina zavarivanja [mm/s],
- unos topline [kJ/mm].

Tabela 10: Tabela parametara zavarivanja čeličnih limova premazanih temeljnim premazom sa trokomponentnim plinskim mješavinama *Ferroline C6 X1* (1A) i *Ferroline C12 X2* (1B)

Uzorak	Opis stanja površine uzorka	U [V]	I [A]	$v_{žice}$ [m/min]	t [s]	v_{zav} [mm/s]	Unos topline [kJ/mm]
1A	sačmarena površina lima sa temeljnim premazom EMC 182 K-DB Weiss	27	245	9,6	42,4	7,1	0,75
1B		26,9	250	9,6	41	7,3	0,76

Rezultat zavarivanja uzoraka 1A i 1B prikazani su na slici 17.



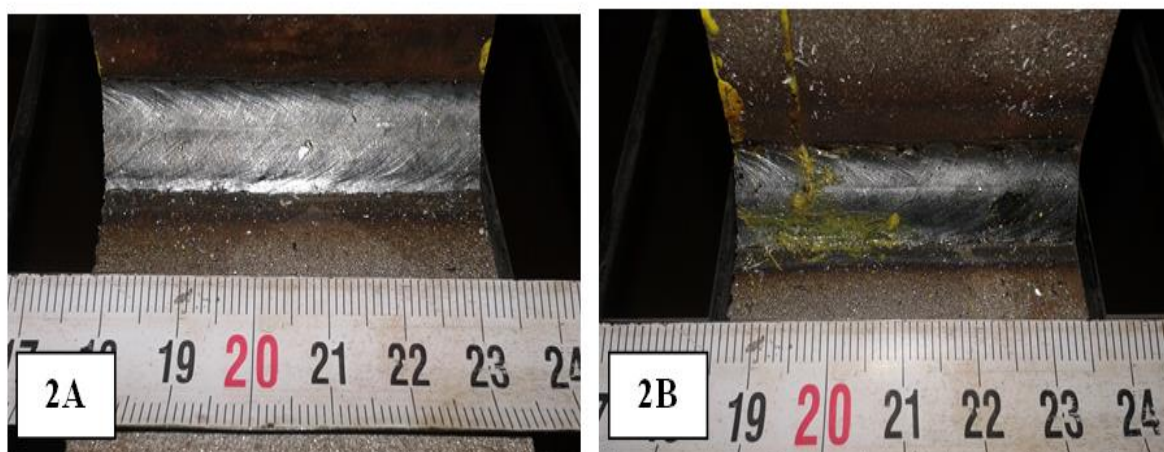
Slika 17: Rezultati zavarivanja čeličnih limova premazanih temeljnim premazom sa trokomponentnim plinskim mješavinama: 1A – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6 X1*; 1B – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C12 X2*.

Na slici 17. na uzorku 1A vidljiva je burnija površinska reakcija na zavarivanje čeličnih ploča premazanih temeljnih premazom. Naime, uzorak 1A zavarivan je pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1* koja sadrži 1% O₂ u svom kemijskom sastavu, a uzorak 1B zavaren je pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2* koja sadrži 2% O₂. Dakle, na temeljnom premazu lošija je kvaliteta izvedbe zavarenog spoja na uzorku 1A zbog manjeg oksidacijskog potencijala trokomponentne plinske mješavine.

Tabela 11: Tabela parametara zavarivanja metalno čistih (sačmarenih) čeličnih limova sa trokomponentnim plinskim mješavinama *Ferroline C6 X1* (2A) i *Ferroline C12 X2* (2B).

Uzorak	Opis stanja površine uzorka	U [V]	I [A]	V _{žice} [m/min]	t [s]	V _{zav} [mm/s]	Unos topline [kJ/mm]
2A	pjeskarena površina lima; metalno čista	27,6	233	9,6	38,3	7,8	0,70
2B	površina	27	235	9,6	33	9,1	0,65

Uspoređujući tabelu 10. i prethodnu tabelu 11. odmah je vidljivo da su struje zavarivanja manje vrijednosti od struja zavarivanja uzoraka 1A i 1B koji su bili premazani temeljnim premazom. Isto tako, pri zavarivanju uzoraka 2A i 2B i vrijeme zavarivanja bilo je kraće nego kod zavarivanja uzoraka 1A i 1B, a time je i brzina zavarivanja uzoraka 2A i 2b znatno veća. Razlog ovim vidljivim promjenama parametara jest u kvaliteti pripreme površine prije zavarivanja. Naime, temeljni premaz EMC 182 K-DB *Weiss* predstavlja nepovoljnu barijeru za kvalitetnu izvedbu zavarenog spoja. Prilikom zavarivanja, toplinskim razaranjem temeljnog premaza koji je po kemijskom sastavu ugljikovodik, dolazi do oslobađanja produkata izgaranja tog ugljikovodika u obliku plinskih mjehurića koji prilikom skrućivanja taline zavares oblikuju pore koje pak prema normi HR EN ISO 5817:2014 predstavljaju volumenske greške zavarenog spoja. Vizualnom kontrolom utvrđeno je da je kvaliteta izvedbe zavarenog spoja na uzorcima 2A i 2B znatno bolja od one na uzorcima 1A i 1B. Izgled uzoraka 2A i 2B prikazan je na slici 18.

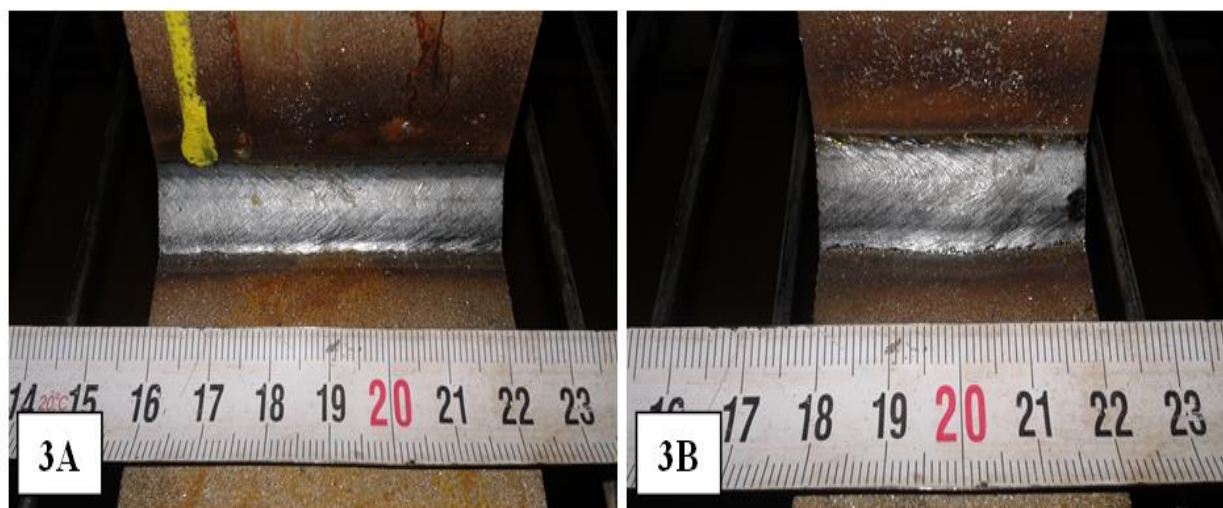


Slika 18: Rezultati zavarivanja čeličnih metalno čistih (sačmarenih) limova sa trokomponentnim plinskim mješavinama: 2A – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6 X1*; 2B – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C12 X2*.

Tabela 12: Tabela parametara zavarivanja metalno čistih (sačmarenih) čeličnih limova, sa namjerno izazvanom općom korozijom (hrđom), pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina *Ferroline C6 X1* (3A) i *Ferroline C12 X2* (3B)

Uzorak	Opis stanja površine uzorka	U [V]	I [A]	V _{žice} [m/min]	t [s]	V _{zav} [mm/s]	Unos topline [kJ/mm]
3A	metalno čista (sačmarena)	27,6	230	9,6	38,4	7,8	0,56
3B	površina čeličnog lima sa namjerno stimuliranom općom korozijom (hrđom)	27,6	233	9,6	41	7,3	0,69

Rezultat zavarivanja uzoraka 3A i 3B prikazani su na slici 19.



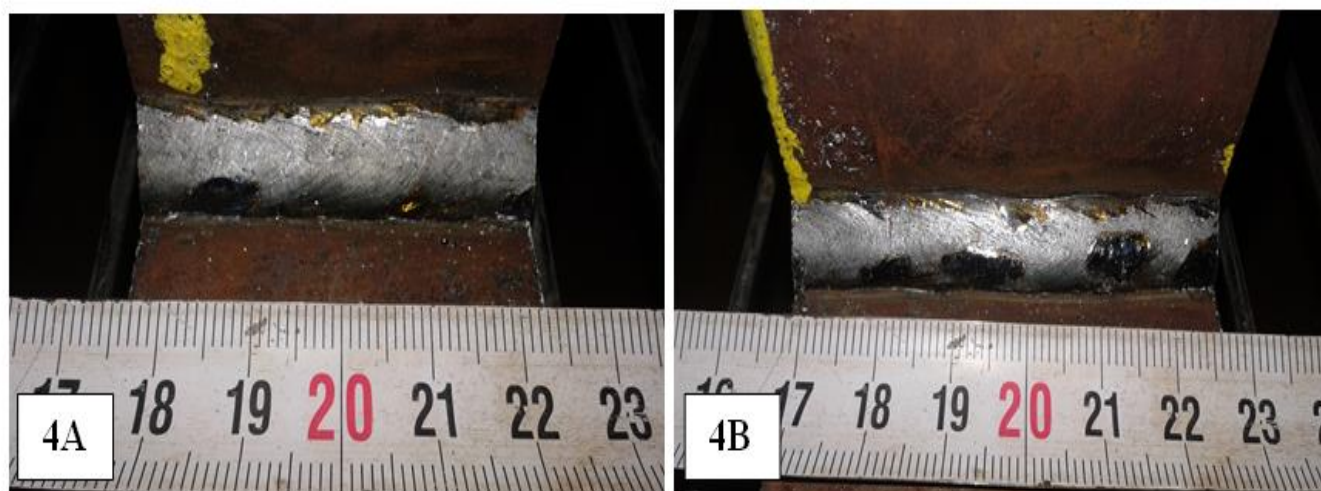
Slika 19: Rezultati zavarivanja čeličnih metalno čistih (sačmarenih) limova, sa namjerno izazvanom općom korozijom (hrđa), pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina: 3A – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6 X1*; 3B – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C12 X2*

Uspoređujući parametre zavarivanja uzoraka 2A i 2B čija je kvaliteta površine čeličnog prije izvedbe zavarenog spoja bila znatno bolja od one kod uzoraka 3A i 3B, vidljivo je da nema znatno većih razlika. Isto tako, vizualnom kontrolom i usporedbom uzoraka 3A i 3B utvrđeno je da je kvaliteta izvedbe zavarenog spoja gotovo identična onoj kod zavarivanja uzoraka 2A i 2B što potvrđuje da je plinska zaštita trokomponentnih plinskih mješavina uspjela „kompenzirati“ smanjenje kvalitete površine lima na uzorcima 3A i 3B, bez negativnih utjecaja na kvalitetu izvedbe zavarenih spojeva. Naime, induciranje opće korozije (hrđe) na uzorcima 3A i 3B u općenitim uvjetima zavarivanja u proizvodnji, znatno nepovoljno utječe na kvalitetu izvedbe zavarenog spoja stvarajući greške kao što su naljepljivanje, ugorine i poroznost. Hrđa je, po kemijskom sastavu oksid, produkt opće korozije koja uzrokuje površinsko kemijsko razaranje metala pod utjecajem različitih atmosferilija, najčešće vlage iz zraka ili vode koja se nalazi na površini čeličnog materijala.

Tabela 13: Tabela parametara zavarivanja nesačmarenih čeličnih limova, sa površinom prekrivenom okujinom, pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina *Ferroline C6 X1* (4A) i *Ferroline C12 X2* (4B)

Uzorak	Opis stanja površine uzorka	U [V]	I [A]	V _{žice} [m/min]	t [s]	V _{zav} [mm/s]	Unos topline [kJ/mm]
4A	nesačmarena površina čeličnog	27,5	240	9,6	44,8	6,7	0,79
4B	lima sa okujinom	27,6	240	9,6	42	7,1	0,74

Rezultat zavarivanja uzoraka 4A i 4B prikazani su na slici 20.



Slika 20: Rezultati zavarivanja čeličnih nesačmarenih limova sa okujinom, pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina: 4A – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C6 X1*; 4B – trokomponentna plinska mješavina *Ferroline C12 X2*

Okujina je po kemijskom sastavu oksid ljubičasto – smeđe boje koji nastaje kao produkt izgaranja na površini, pri proizvodnji pojedinih čeličnih limova tehnologijom toplog valjanja. Okujina se mora odstraniti sačmarenjem površine čeličnog lima jer uzrokuje poteškoće pri samom zavarivanju i greške poput naljepljivanja, ugorina i pora u zavarenom spoju nakon izvedbe zavarivanja. Uspoređujući parametre zavarivanja uzoraka 2A i 2B sa parametrima zavarivanja uzoraka 4A i 4B, vidljiv je značajan porast struje zavarivanja te produljenje vremena trajanja zavarivanja (manja brzina zavarivanja). Isto kao i u slučaju zavarivanja uzoraka 1A i 1B, temeljni premaz i okujina predstavljaju značajne površinske barijere prema cilju kvalitetne izvedbe zavarenog spoja što je dokazano vizualnom kontrolom uzoraka 1A i 1B te 4A i 4B gdje su jasno vidljive greške u zavarenom spoju poput poroznosti, ugorina, prskanja i velike količine produkata izgaranja (troske).

2.2 Materijali i metode za drugi dio eksperimenta

2.2.1 Materijal podloge

U drugom planu pokusa kao osnovni materijal za zavarivanje korišten je opći konstrukcijski čelik kvalitete S355 J2 + N čiji je kemijski sastav prikazan u tabeli 14.

Tabela 14: Kemijski sastav osnovnog materijala [17]

Maseni udio, [%]				
C	Mn	P	S	Si
0,22	1,60	0,03	0,03	0,55

Dimenzija limova od spomenutog osnovnog materijala je 300 x 150 x 15 mm. Položaj zavarivanja, prema HRN EN ISO 6947:2011, je PB, kutni spoj. Primjenjena je neutralna tehnika zavarivanja. Cilj ovog dijela eksperimenta jest usporediti makro izbruske zavarenih spojeva koji su zavareni sa trokomponentnim plinskim mješavinama *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2* te dvokomponentnom plinskom mješavinom *Ferroline C18*, na način prikazan u tabeli ? koja prikazuje plan pokusa za drugi dio eksperimenta. U ovom dijelu eksperimenta na pojedinom uzorku, definiranom u tabeli 15., zavarena su dva jednoslojna zavares i to svaki sa različitom plinskom mješavinom (dvokomponentnom i/ili trokomponentnom) s ciljem usporedbe razlika u efektu plinske zaštite na kvalitetu izvedbe zavarenog spoja. Oznake u tabeli 15. predstavljaju:

- C1 – zavareni spoj izveden pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*,
- C2 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*,
- D1 – zavareni spoj izveden pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*,
- D2 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*,

- E1 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*,
- E2 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*.

Tabela 15: Plan pokusa za drugi dio eksperimenta zavarivanja dvokomponentnim i trokomponentnim plinskim mješavinama

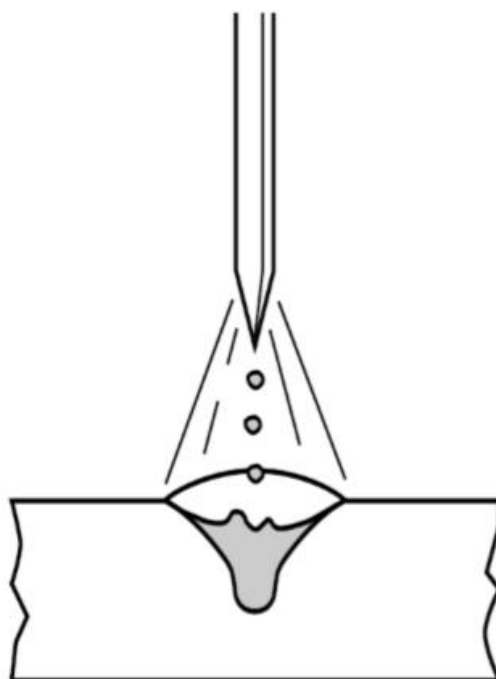
Oznaka uzorka Plinska zaštita	C	D	E
<i>Ferroline C18</i>	C1	D1	-
<i>Ferroline C6 X1</i>	C2	-	E2
<i>Ferroline C12 X2</i>	-	D2	E1

2.2.2 Prijenos metala u štrcajućem električnom luku

Prijenos metala štrcajućim lukom (*eng.* Axial Spray Transfer) je način prijenosa metala u električnom luku kojeg karakterizira velik unos topline pri čemu se kontinuirano dobavljana žica tali usljed te topline i u obliku malih kapljica, slobodnim padom, putuje duž električnog luka bez da elektroda dodiruje radni komad. Odabir ovog načina prijenosa ovisi o debljini osnovnog materijala i mogućnosti zavarivanja u određenim, povoljnim, položajima. Naziv je dobio zbog toga što te male kapljice padaju aksijalno na radni komad. Parametri zavarivanja su veći nego kod prethodnih načina prijenosa metala i iznose: za napon: 25 - 40V i za struju zavarivanja: 200-600A. [18]

Da bi se postigao način prijenosa štrcajućim lukom vrlo često se koriste plinske mješavine: argon + 1,5% O₂ i argon + CO₂ (gdje % CO₂ mora biti manji od 18%). Duboka penetracija dobiva se plinskom mješavinom od 95% argona + 5% O₂ dok se plinskim mješavinama u kojima ima više od 10% CO₂ zavar zaobljuje i ima manju penetraciju. Prijenos metala

štrcajućim lukom koristi se za zavarivanje ugljičnih čelika, visokolegiranih čelika kao i legura nikla. Prednosti ovog načina su: velik depozit, velika iskorištenost elektrode (više od 98%), mogućnost korištenja širokog spektra dodatnih materijala i velikog raspona promjera žice, nema prskanja i ne zahtjeva naknadno čišćenje, vrlo lako za automatiziranje. Nedostaci ovog postupka su: ograničenost u vidu položaja zavarivanja, zaštitni plinovi su skuplji nego kod prijašnjih načina i mogućnost primjene samo na debljim materijalima. Shematski prikaza zavarivanja u štrcajućem električnom luku prikazan je na slici 21.



Slika 21: Prijenos materijala u štrcajućem električnom luku [11]

2.2.3 Uredaj za zavarivanje

U drugom dijelu eksperimenta korišten je uređaj za zavarivanje marke OTC Daihen, model Welbee P500L. Uređaj se koristi za MIG/MAG zavarivanje općih konstrukcijskih čelika, nehrđajućih čelika, aluminija te za kombinaciju nekih od navedenih materijala. Uz Welbee P500L uređaj za zavarivanje korišteno je automatsko pokretno postolje BUG-O System Automat (model: MDS – 1002) za prihvrat pištolja za zavarivanje i generiranje brzine zavarivanja u iznosu od 40 cm/min.

Oprema potrebna za izvođenje drugog dijela eksperimenta prikazani su na slici 22.



Slika 22: Oprema primjenjena za izvođenje drugog dijela eksperimenta

2.2.4 Rezultati i rasprava drugog dijela eksperimenta

2.2.4.1 Parametri zavarivanja i makroizbrusci uzoraka

U prvom dijelu eksperimenta pratilo se zavarivanje zavarenih spojeva pod zaštitom triju različitih plinskih mješavina navedenih u prethodnom tekstu. Tijekom procesa zavarivanja izmjereni su slijedeći parametri:

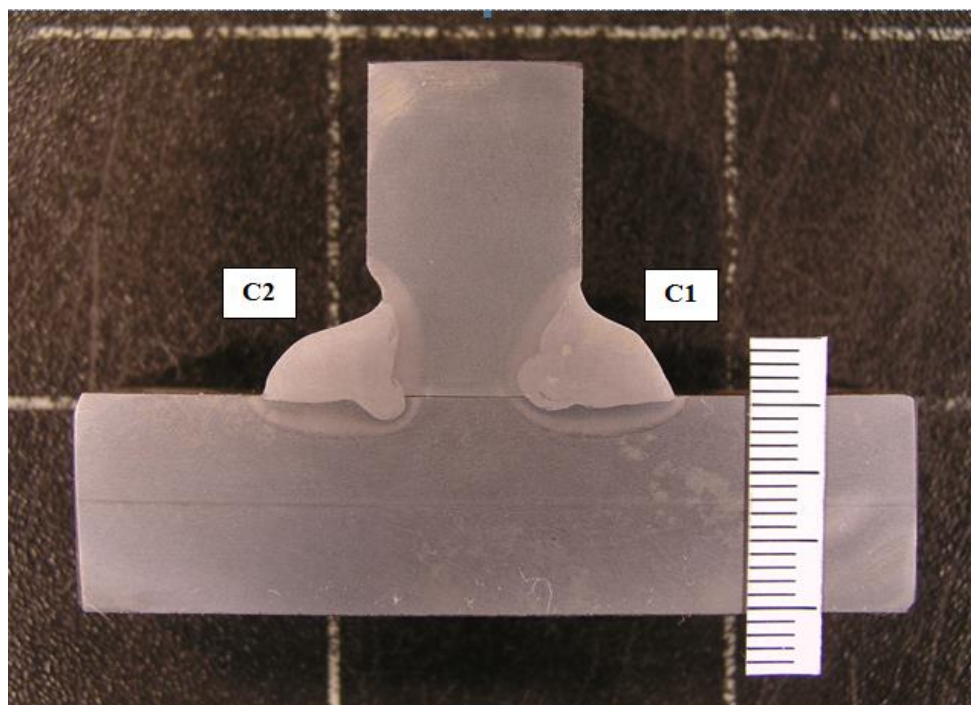
- struja zavarivanja [A],
- napon [U],
- brzina žice [m/min],
- brzina zavarivanja [cm/min],
- vrijeme zavarivanja [s],
- unos topline [kJ/mm].

U tabeli 16. prikazani su rezultati zavarivanja zavarenih spojeva za uzorak C. Izlazni protok dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18* iznosio je 18 l/min, a trokomponentne *Ferroline C6 X1*, 20 l/min.

Tabela 16: Rezultati parametara zavarivanja uzorka C

Uzorak C	Plinska zaštita pri zavarivanju	U [V]	I [A]	$v_{\text{žice}}$ [m/min]	t [s]	Unos topline [kJ/mm]
C1	<i>Ferroline C18</i>	31,3	328	9,8	47,5	1,23
C2	<i>Ferroline C6 X1</i>	30,4	334	9,8	46,42	1,22

Makro izbrusak uzorka C prikazan je na slici 23.



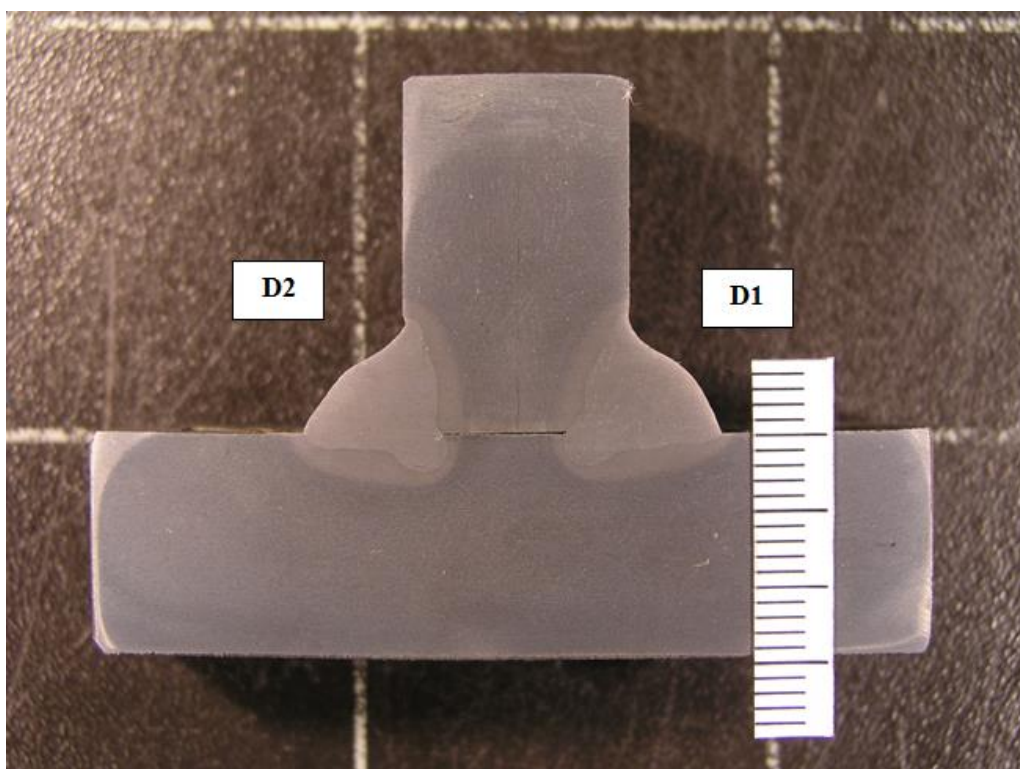
Slika 23: Makro izbrusak uzorka C gdje je zavar izveden pod zaštitom: C1 - dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*; C2 - trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*

U tabeli 17. prikazani su rezultati zavarivanja zavarenih spojeva za uzorak D. Izlazni protok dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18* iznosio je 18 l/min, a trokomponentne *Ferroline C12 X2* 20 l/min.

Tabela 17: Rezultati parametara zavarivanja uzorka D

Uzorak D	Plinska zaštita pri zavarivanju	U [V]	I [A]	$v_{\text{žice}}$ [m/min]	t [s]	Unos topline [kJ/mm]
D1	<i>Ferroline C18</i>	31,4	311	9,8	45,18	1,72
D2	<i>Ferroline C12 X2</i>	31,8	309	9,8	44,95	1,18

Makro izbrusak uzorka D prikazan je na slici 24.



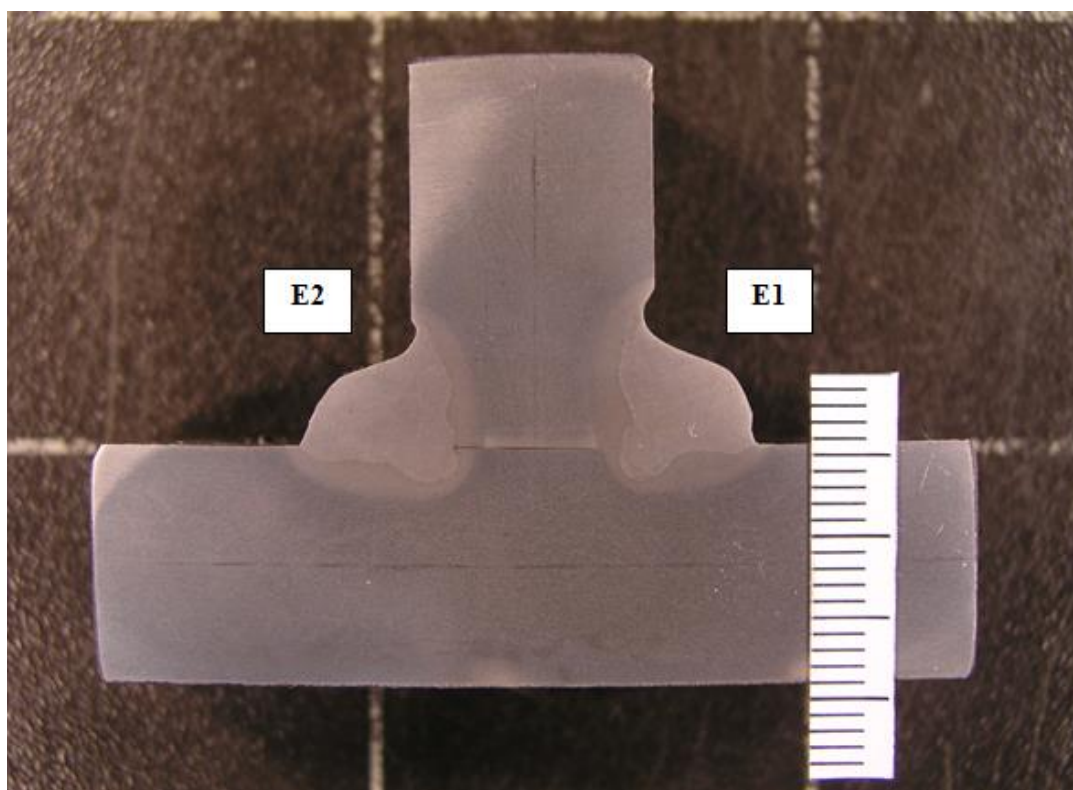
Slika 24: Makro izbrusak uzorka D gdje je zavar izveden pod zaštitom: D1 - dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*; D2 - trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*

Posljednja tabela 18. prikazuje rezultate parametara zavarivanja zaverenih spojeva E1 i E2, s ciljem usporedbe trokomponentnih plinskih mješavina *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2*

Tabela 18: Rezultati parametara zavarivanja uzorka E

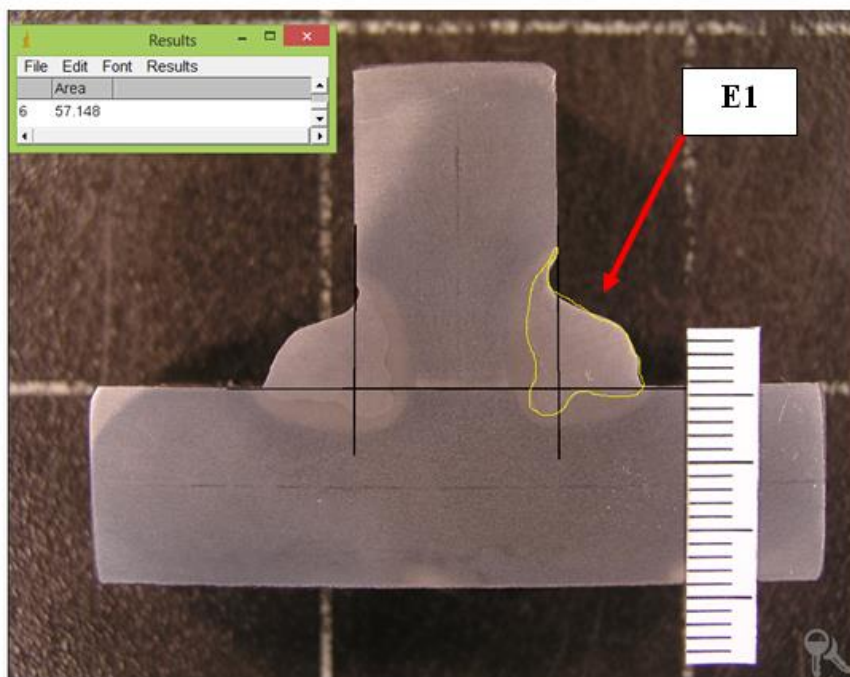
Uzorak E	Plinska zaštita pri zavarivanju	U [V]	I [A]	V _{žice} [m/min]	t [s]	Unos topline [kJ/mm]
E1	<i>Ferroline C12 X2</i>	29,4	328	9,8	45,93	1,16
E2	<i>Ferroline C6 X1</i>	30,8	311	9,8	45,44	1,15

Makro izbrusak uzorka E prikazan je na slici 25.

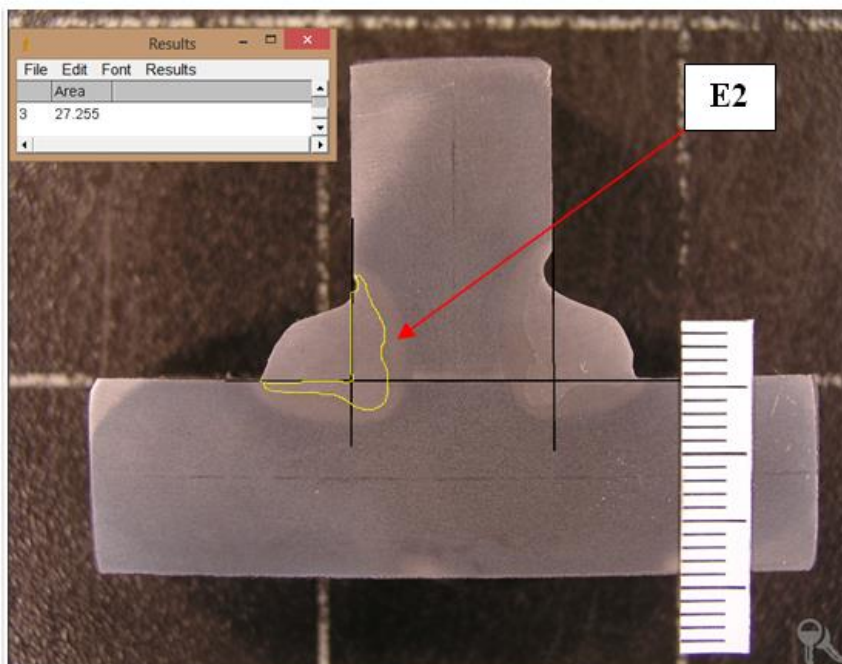


Slika 25: Makro izbrusak uzorka E gdje je zavar izveden pod zaštitom: E1 - dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*; E2 - trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*

Programskim paketom za analizu fotografija *ImageJ* analizirana je površina metala zavora, bočne i dubinske penetracije pojedinog zavarenog spoja. Primjer analize površine metala zavora prikazan je na slici 26., bočne penetracije na slici 27. i dubinske penetracije na slici 28.



Slika 26: Analiza površine metala zavora E1 pomoću alata ImageJ

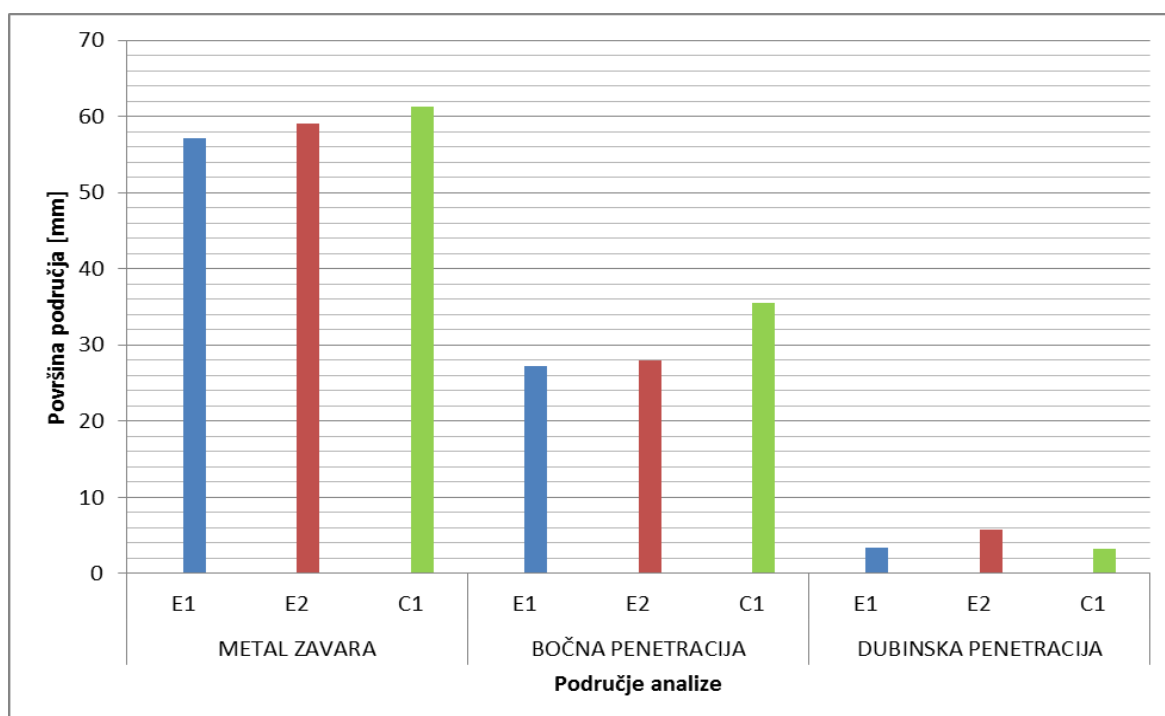


Slika 27: Analiza površine bočne penetracije zavora E2 pomoću alata ImageJ



Slika 28: Analiza površine dubinske penetracije zavora C1 pomoću alata ImageJ

Dijagram usporedbe površina koje su analizirane prikazan je na slici 29.



Slika 29: Dijagram usporedbe analiziranih površina zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: E1 – trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*, E2 - trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1* i C1 - dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*

Analizom je utvrđeno da je površina metala zavara najveća pri zavarivanju dvokomponentnom plinskom mješavinom *Ferroline C18* najvjerojatnije zbog najvećeg udjela CO₂ u kemijskom sastavu ove plinske mješavine. CO₂ doprinosi širenju električnog luka pri zavarivanju, što ima za posljedicu širu zonu metala zavara. Isto vrijedi i za površinu bočne penetracije. Međutim, zavarivanje trokomponentnim plinskim mješavinama *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2* znatno doprinosi povećanju dubinske penetracije zavara zbog povećanog udjela argona u tim plinskim mješavinama koji ima za posljedicu karakterističnu prstastu profilnu penetraciju zavarenog spoja.

2.2.4.2 Ispitivanje tvrdoće uzoraka prema Vickersu

Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu provodi se na unaprijed pripremljenom uzorku. Najčešće je to brušenje i poliranje, te nagrizanje metala uzorka u 3% - tnoj otopini dušićne kiseline. Često puta nakon ispitivanja makro strukture iskoristi se isti uzorak za ispitivanje tvrdoće, pa se nakon toga on brusi i dalje priprema za ispitivanje mikro strukture. Pripremljeni uzorak stavlja se na stroj za ispitivanje tvrdoće gdje se učvrsti i analizira. Na postavljeni uzorak djeluje se silom preko indentora u obliku četverostrane piramide napravljene od dijamanta, zbog visoke vrijednosti tvrdoće tog materijala. Tvrdoća po metodi Vickersa izračunava se iz sile pritiska F [N] i utisnute površine indentora A [mm²], koju određujemo mjerenjem dijagonala d_1 i d_2 [mm²]. U ovom slučaju, za ispitivanje tvrdoće po Vickersu primjenilo se opterećenje od $F = 98,04$ N, odnosno HV 10. Izraz za izračunavanje tvrdoće prikazan je u daljnjem tekstu:

$$HV = 0,102 * (F/A), \quad (1)$$

gdje je:

HV – oznaka za ispitivanje tvrdoće po Vickersu,

F – sila opterećenja za ispitivanje tvrdoće,

A – otisnuta površina indentora na uzorku,

$$A = d / (\alpha * \sin(136/2)) \quad (2)$$

gdje je:

d – dužina otiska dijagonale indentora na uzorku koji se ispituje.

Izraz za izračunavanje rezultatne dijagonale uzorka:

$$d = (d_1 + d_2) / 2, \quad (3)$$

gdje je:

d₁ – dužina prve dijagonale indentora na uzorku koji se ispituje,

Uređaj za ispitivanje tvrdoće prema Vickersu prikazan je na slici 30.

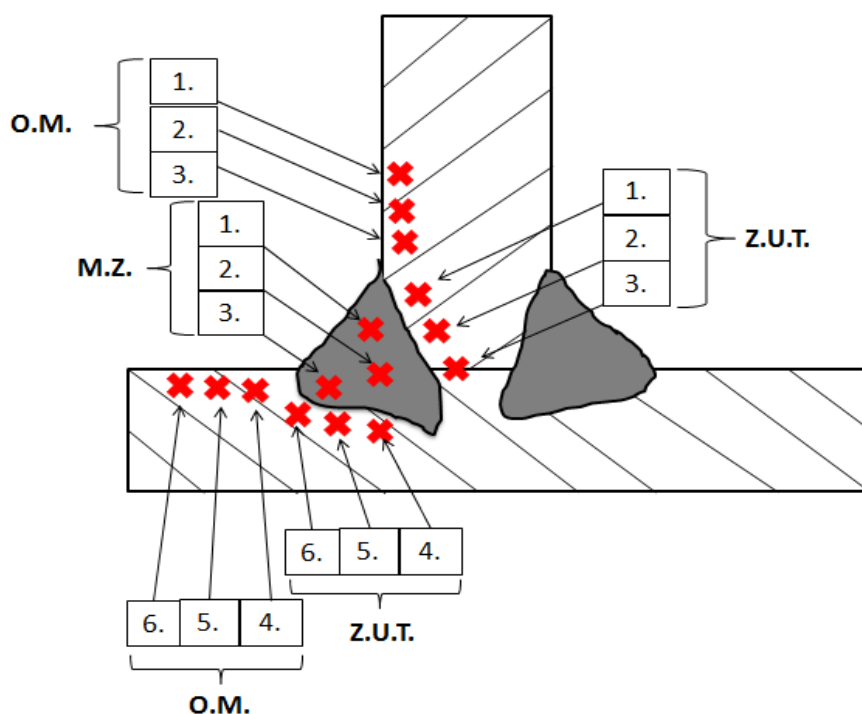


Slika 30: Tvrdomjer marke REICHER KL2 za ispitivanje tvrdoće po Vickersu

Rezultati dobiveni mjerenjem prikazani su dijagramima na slikama za svaki pojedini uzorak (C, D i E). Raspored uzorkovanja vrijednosti tvrdoće po Vickersu prikazan je na slici 31. i kao takav se primjenjivao pri ispitivanju svakog pojedinog uzorka. Na svakome makro izbrusku zavarenog spoja napravljena su:

- 6 mjerenja tvrdoće u području osnovnog materijala (O.M.),
- 6 mjerenja tvrdoće u području zone utjecaja topline (Z.U.T.),
- 3 mjerenja tvrdoće u području metala zavara (M.Z.).

Raspored uzorkovanja prikazana je na slici 31., te vrijedi simetrično za obje strane jednog uzorka, odnosno za oba zavarena spoja na jednom uzorku.



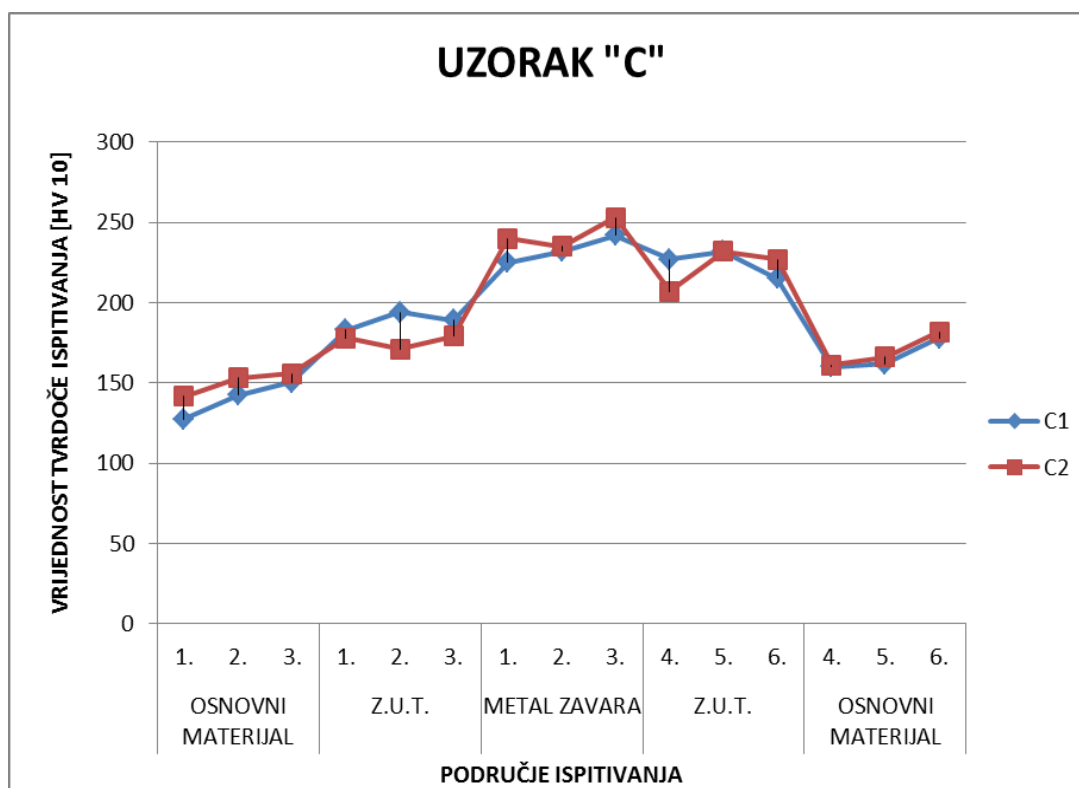
Slika 31: Raspored mjerenja vrijednosti tvrdoće po Vickersovoj metodi na makro izbrusku zavarenog spoja

Vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće za pojedini uzorak (C, D i E) prikazani su u tabeli 19.

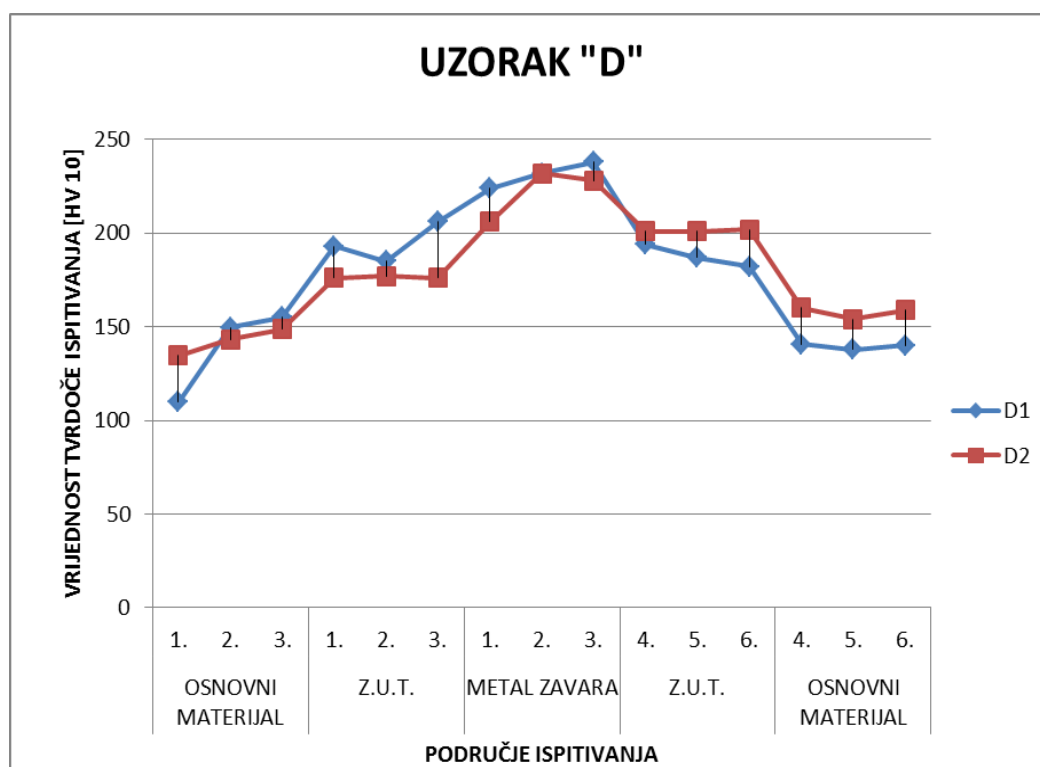
Tabela 19: Rezultati ispitivanja tvrdoće za uzorke C, D i E

PODRUČJE ISPITIVANJA	OSNOVNI MATERIJAL			Z.U.T.			METAL ZAVARA			Z.U.T.			OSNOVNI MATERIJAL		
Mjerno mjesto (prema shemi)	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	4.	5.	6.
Oznaka uzorka															
C1	127,7	142,3	150,5	183	194	189	225	232	242	227	232	215	160	162	178
C2	141,5	153	156	178	171	179	240	235	253	207	232	227	161	166	182
D1	109,8	149,7	155	193	185	206	224	232	238	194	187	182	140,7	137,7	140
D2	134,7	143,1	148,8	176	177	176	206	232	228	201	201	202	160	154	159
E1	142,3	143,9	157	198	182	188	219	235	233	203	198	205	148,8	131,9	124,5
E2	141,5	116,5	155	168	170	181	219	227	224	198	189	186	149,7	140	134

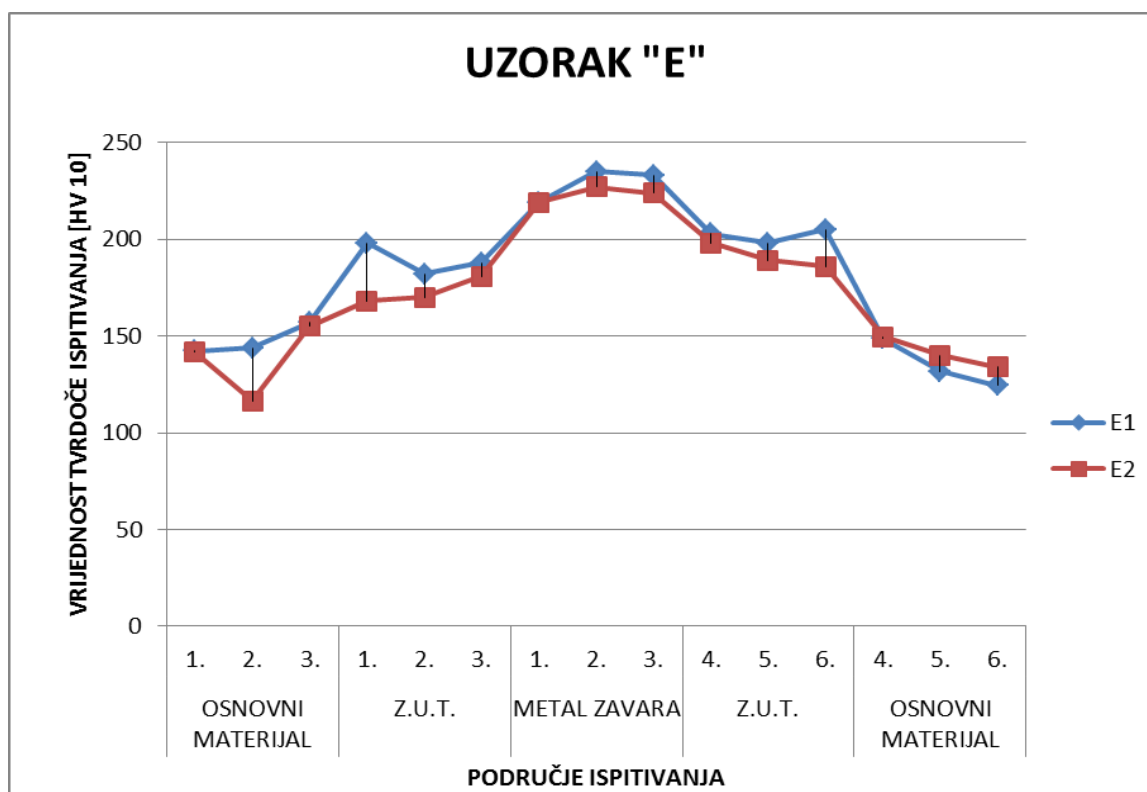
Dijagram distribucije tvrdoće za uzorak C, D i E prikazani su na slikama 32., 33. i 34.



Slika 32: Dijagram distribucije tvrdoće zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: C1 – dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*, C2 – trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 XI*

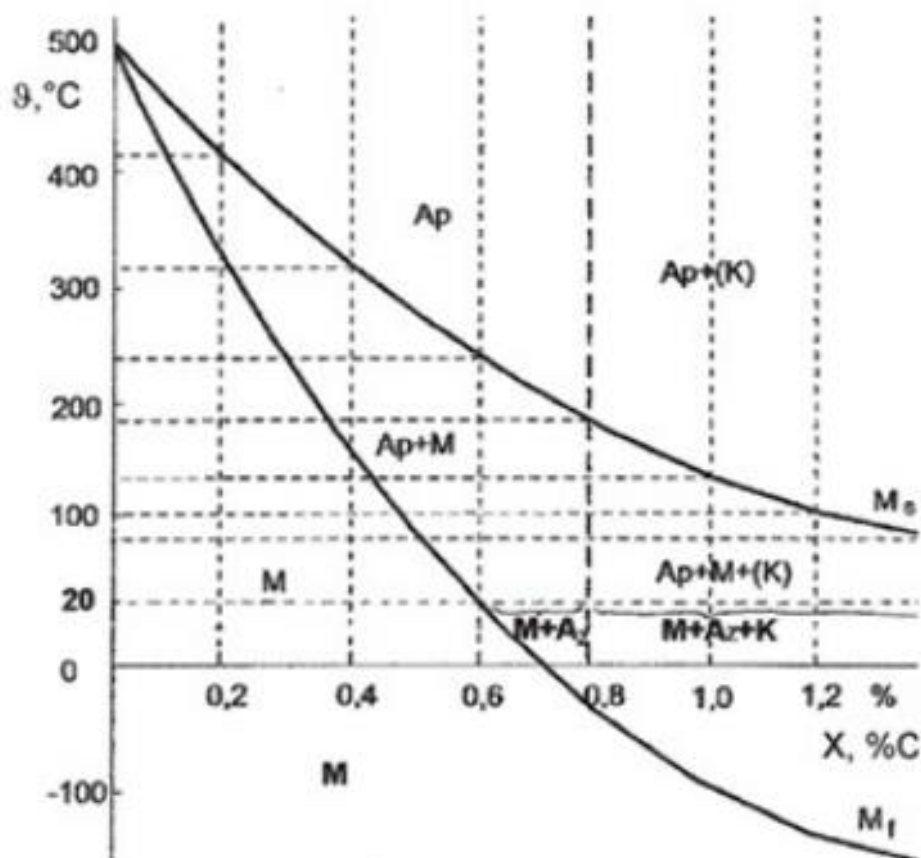


Slika 33: Dijagram distribucije tvrdoće zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: D1 – dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*, D2 – trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*



Slika 34: Dijagram distribucije tvrdoće zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom: E1 – trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*, D2 – trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*

Uspoređujući krivulje distribucije tvrdoće zavarenih spojeva na uzorcima C, D i E vidljivo je da tvrdoća nijednog zavarenog ne prelazi 250 HV, što je dobro za svojstvo zavarenog spoja na općem konstrukcijskom čeliku kvalitete S355J2 + N. Isto tako, prisutnost bakra u dodatnom materijalu uzrokuje povišenje vrijednosti tvrdoće u samom metalu zavara svakog zavarenog spoja na uzorku. Naime, bakar je gamageni element koji omogućuju stvaranje monofazne austenitne mikrostrukture koja je neophodna za nastajanje martenzitne mikrostrukture u metalu zavara koja nastaje nakon završetka zavarivanja, odnosno pri hlađenju zavarenog spoja. No, kod općih konstrukcijskih čelika kvalitete S235 J2 GR i S355J2 + N, koji su korišteni u ovom eksperimentalnom dijelu, ne postoji opasnost od spontanog zakaljivanja metala zavara, odnosno znatne razlike u vrijednostima tvrdoće u metalu zavara i osnovnom materijalu. Naime ti čelici sadrže manje od 0,6% ugljika u svom kemijskom sastavu, te prema tome ne spadaju u grupu konvencionalno zakaljivih čelika prema Uptonovom dijagramu prikazanom na slici 35.



Slika 35: Uptonov dijagram ovisnosti sadržaja ugljika i temperature o početku i završetku stvaranja martenzitne mikrostrukture u čelicima [19]

2.3 Materijali i metode za treći dio eksperimenta

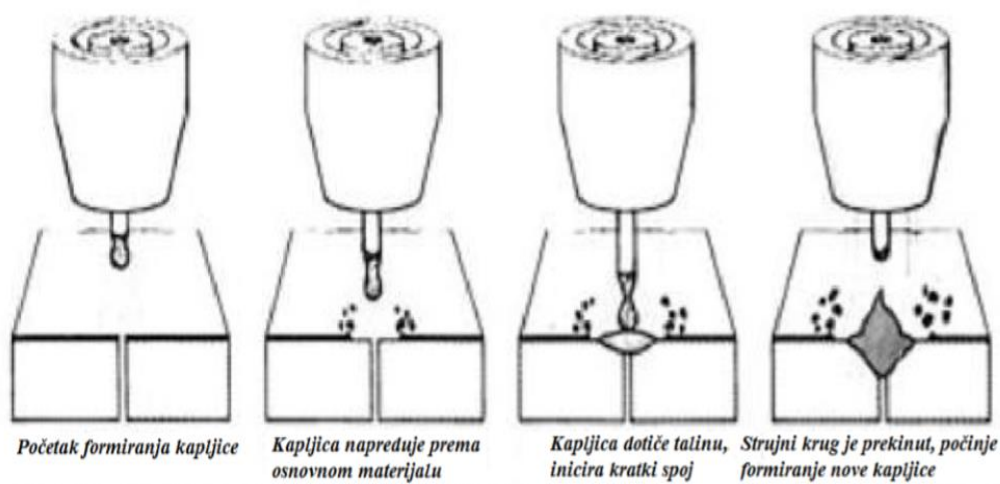
U trećem dijelu eksperimenta korišten je metalno čist čelični lim kvalitete S235J2 + N, dimenzija 300 x 125 x 4 mm. Uređaj za MAG zavarivanje bio je isti kao i u drugom dijelu eksperimenta, *Welbee P500L*. Korištena je ista vrsta dodatnog materijala za zavarivanje kao u prvom dijelu eksperimenta, samo što je u ovom slučaju korištena debljina žice Ø 1,0 mm. Položaj zavarivanja, prema normi HRN EN ISO 6947:2011, bio je PF, odnosno vertikalno zavarivanje prema gore, uz lagano „njihanje“ električnog luka. Cilj ovog dijela eksperimenta je subjektivni doživljaj atestiranog MAG zavarivača pri zavarivanju općeg konstrukcijskog čelika u prisilnom položaju, različitim plinskim mješavinama. Prijenos metala u električnom luku bio je kratkim spojevima. Izvedene su tri zavarena spoja od kojih je svaki izveden pod zaštitom određene plinske mješavine:

- F1 – zavareni spoj izveden pod zaštitom *Ferroline C18*,
- F2 – zavareni spoj izveden pod zaštitom *Ferroline C6 X1*,
- F3 – zavareni spoj izveden pod zaštitom *Ferroline C12 X2*.

2.3.1 Prijenos metala u električnom luku kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima (*eng.* Short-Circuit Metal Transfer) je takav prijenos metala kod kojeg se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kratkih spojeva. Prijenos materijala se događa kad je elektroda u kratkom spoju sa osnovnim materijalom. To je proces kod kojeg je karakterističan mali unos topline. Na uspješnost ovog načina prijenosa metala utječe promjer elektrode i vrsta zaštitnog plina. Pri prijenosu metala kratkim spojevima, u usporedbi sa ostalim načinima, koristi se manji napon i manja jakost struje zavarivanja. Karakteristične vrijednosti napona kreću se od 13 do 21 V, dok se struje zavarivanja kreću od 50 do 170 A. Broj ciklusa pri ovom načinu prijenosa metala dostiže i do 200 ciklusa/sekundi. Zbog malog unosa topline posebno je pogodan za zavarivanje tanjih materijala (0,6 - 5,0 mm), a često se koristi pri zavarivanju korijena kod cjevovoda. Elektrode koje se koriste pri ovom načinu prijenosa metala promjera su od 0,6 mm do 1,1 mm u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ ili u mješavini sa 75 - 80% argona sa 25 - 20% CO₂. Moguće su još mješavine argona i O₂ ili kod nekih posebnih aplikacija mješavine s tri komponente: argon, CO₂ i O₂. Prednosti ovog načina prijenosa metala su: mogućnost zavarivanja u svim

položajima, dobro podnosi greške u pripremi zavora, manje deformacije zavora usljed manjeg unosa topline, velika iskorištenost elektrode - više od 93%. Ograničenja ovakvog prijenosa metala su: kod rada na terenu potrebno zaštititi područje zavarivanja od utjecaja vjetra, pojava pretjeranog štrcanja i nedovoljno protaljivanje ako nije dobra kontrola procesa, samo za tanje materijale. [20] Shema načina prijenosa metala u električnom luku kratkim spojevima prikazana je na slici 36.

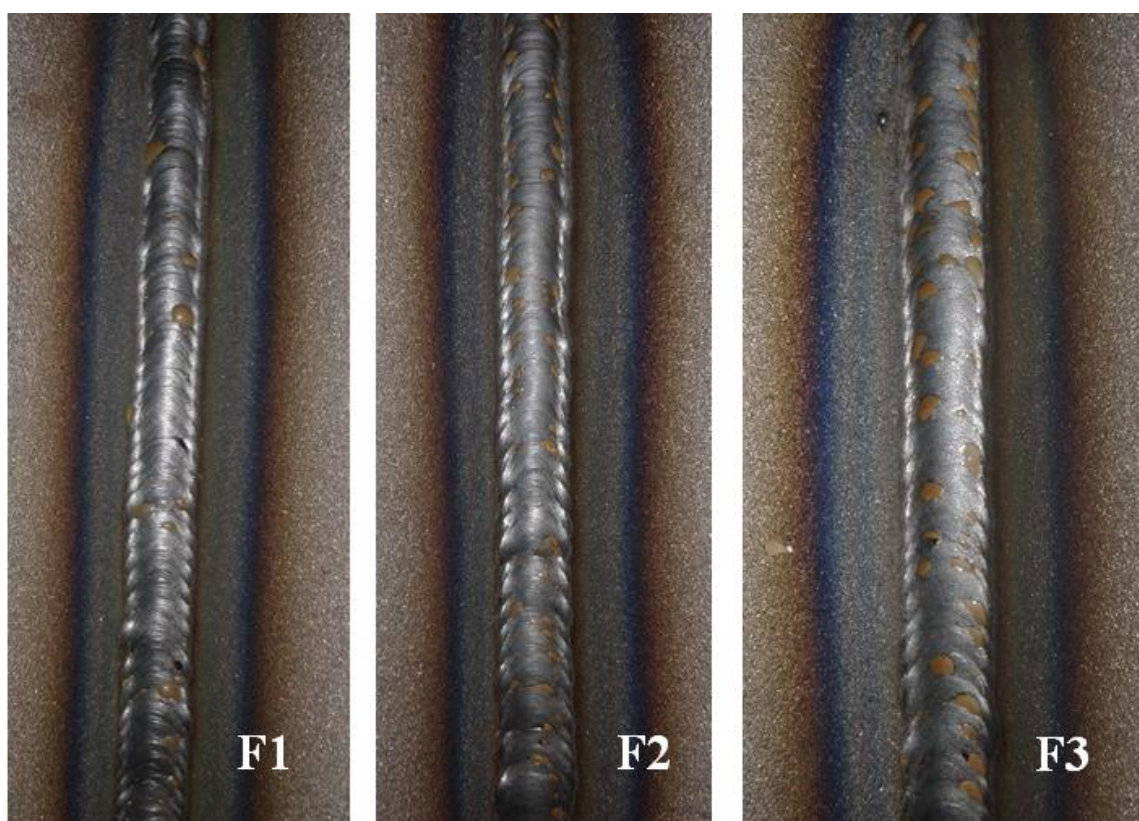


Slika 36: Shema načina prijenosa metala u električnom luku kratkim spojevima [20]

Tabela 20: Rezultati parametara zavarivanja uzoraka F1, F2 i F3

Uzorak	Plinska zaštita pri zavarivanju	U [V]	I [A]	v_{zice} [m/min]	t [s]	v_{zav} [mm/s]	Unos topline [kJ/mm]
F1	<i>Ferroline C18</i>	15,9	122	4,2	65,4	4,6	0,68
F2	<i>Ferroline C6 X1</i>	16,2	123	4,2	65,6	4,6	0,7
F3	<i>Ferroline C12 X2</i>	16,0	118	4,6	61,9	4,8	0,62

Prema rezultatima parametara dobivenih izvedbom zavarenih spojeva F1, F2 i F3 vidljivo je da se vrijeme zavarivanja u prisilnom položaju skratilo uporabom trokomponentnih plinskih mješavina, a posebno se ističe plinska mješavina *Ferroline C12 X2*, pod čijom je zaštitom smanjena struja zavarivanja, a znatno povećana brzina. Rezultat smanjenja parametara zavarivanja jest manji unos topline što svakako povoljno utječe na kvalitetu izvedbe zavarenog spoja i manje toplinske deformacije nakon zavarivanja. Subjektivni doživljaj zavarivača bio je brže zavarivanje upotrebom trokomponentne plinske mješavine, te bolje razlijevanje taline, što je vjerojatno posljedica utjecaja O_2 koji povećava viskoznost metala taline. Slike zavarenih spojeva uzoraka F1, F2 i F3 prikazane su na slici 37.



Slika 37: Slike zavarenih spojeva uzoraka F1, F2 i F3

Na slici 37. je vidljivo da je zavareni spoj uzorka F3 izveden sa manjim nadvišenjem. Razlog tome je udio od 2% O_2 u kemijskom sastavu trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2* koji daje veću viskoznost talini zavara.

2.4 Materijali i metode za četvrti dio eksperimenta

Četvrti dio eksperimenta proveden je s ciljem određivanja kritične struje pri MAG zavarivanju općeg konstrukcijskog čelika kvalitete S355J2 + N, dimenzija 300 x 125 x 15 mm, pod zaštitom različitih plinskih mješavina:

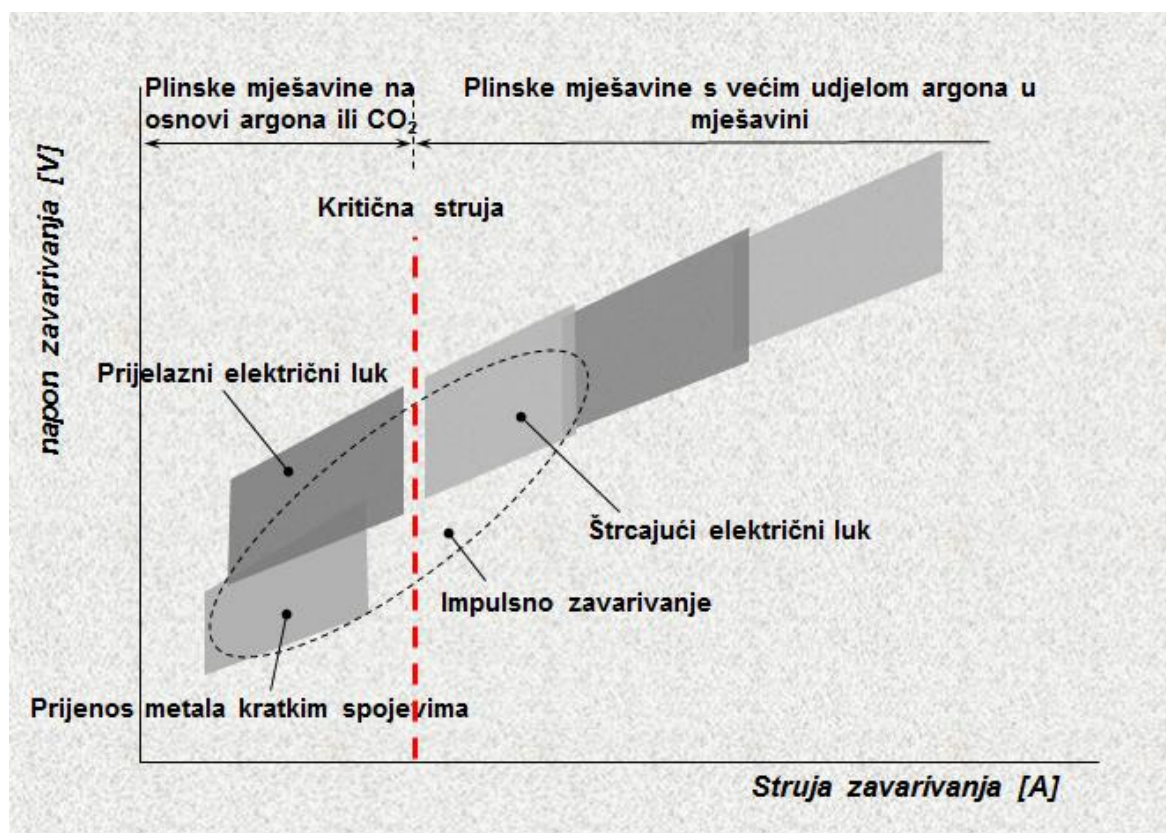
- K1 - zavareni spoj izveden pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*,
- K2 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*,
- F3 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*.

Za određivanje kritične struje za pojedinu plinsku mješavinu korišten je uređaj Welbee P500L u kombinaciji sa automatskim pokretnim postoljem BUG-O System Automat (model: MDS – 1002). Brzina zavarivanja bila je 35 cm/min, položaj zavarivanja HRN EN ISO 6947:2011 PA (vodoravno zavarivanje) i primjenjena je neutralna tehnika zavarivanja. Veličina slobodnog kraja žice iznosi $h = 12$ mm.

2.4.1 Kritična struja pri zavarivanju

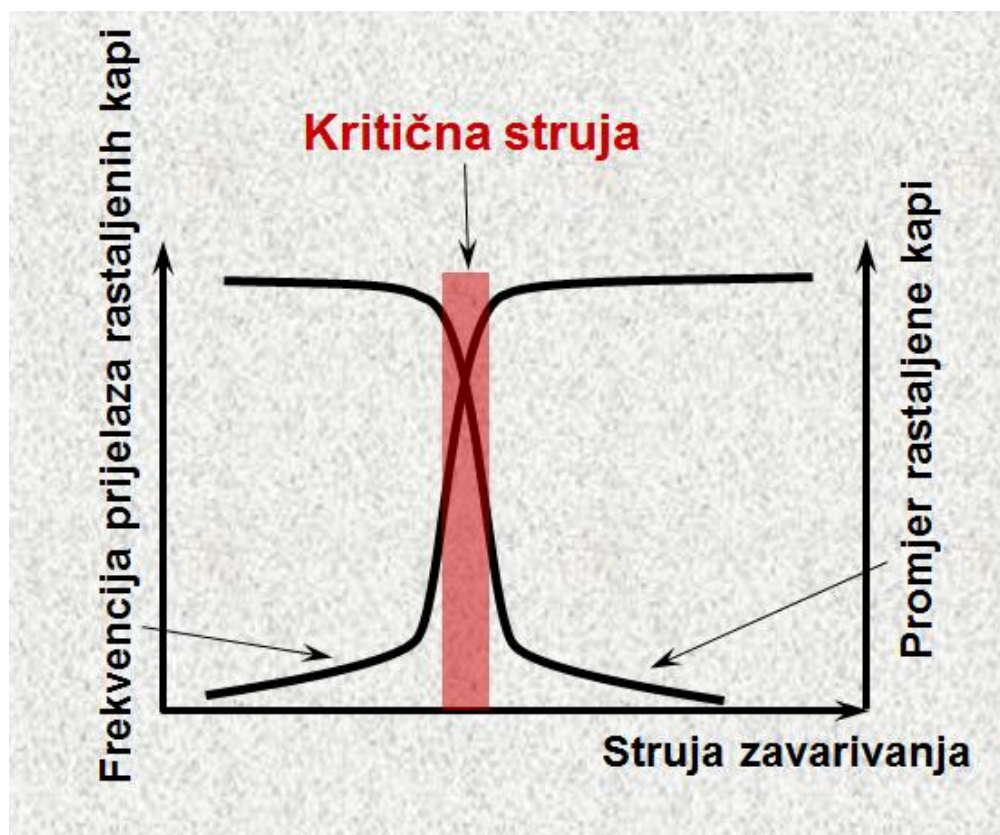
Princip određivanja kritične struje je empirijski način određivanja trenutka prijelaza električnog luka u zavarivanju iz prijelaznog luka u štrcajući luk. Prijenos metala prijelaznim lukom (*eng.* Globular Transfer) je način prijenosa kod kojeg se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kombiniranog djelovanja kratkih spojeva i načina prijenosa metala štrcajućim lukom. Kapljice u prijelaznom luku su veće, nepravilno oblikovane te imaju veći promjer od promjera elektrode što je posljedica većeg napona (22 - 25 V) i veće struje zavarivanja (170-235 A). Ovaj način karakterizira teška kontrola procesa i mnogo prskanja taline. Najčešće se upotrebljava u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ ali i plinskoj mješavini argona i CO₂. Danas se više ne koristi i uspješno je zamijenjen prijenosom metala impulsnim lukom. Prednosti ovog načina prijenosa jesu uporaba jeftinijih zaštitnih plinskih mješavina zbog smanjenog udjela argona, a povećanog udjela aktivne komponente, odnosno CO₂. Bitni nedostatak ovog načina prijenosa metala u električnom luku jest potreba za dužim naknadnim čišćenjem površine na licu zavara i oko zavarenog spoja zbog prskanja te manja iskorištenost elektrode (87-93%).

Ključni pojam za definiranje trenutka prijelaza električnog luka iz prijelaznog u štrcajući luk jest određivanje kritične vrijednosti struje pojedinog električnog luka. Općenito svojstva električnog luka pri MAG zavarivanju ovise o brojnim parametrima, međutim na definiranje kritične vrijednosti struje pojedinog električnog luka ponajviše ovisi o primjenjenom zaštitnom plinu, promjeru elektrode (žice), struji zavarivanja, naponu te veličini slobodnog kraja žice. Postoje brojne računalne simulacije koje mogu predvidjeti vrijednost kritične struje električnog luka u svrhu predviđanja veličine odvojene kapljice metala dodatnog materijala kao i njenu brzinu prijelaza u metalnu kupku. Dodatak većeg udjela CO_2 u plinskim mješavinama povećava vrijednost kritične struje konkretnog električnog luka, te smanjuje frekvenciju odvajanja rastaljenih kapi u metalnu kupku. Ovaj efekt je jasno vidljiv pri udjelu CO_2 koji je veći od 25%. Povećanjem udjela argona, a smanjenjem udjela CO_2 u plinskim mješavinama vrijednost kritične struje pomiče se u niže vrijednosti struja i napona zavarivanja. Taj utjecaj je najbolje vidljiv na dijagramu slike 38.



Slika 38: Utjecaj CO_2 i/ili argona na vrijednost kritične struje zavarivanja pojedinog električnog luka

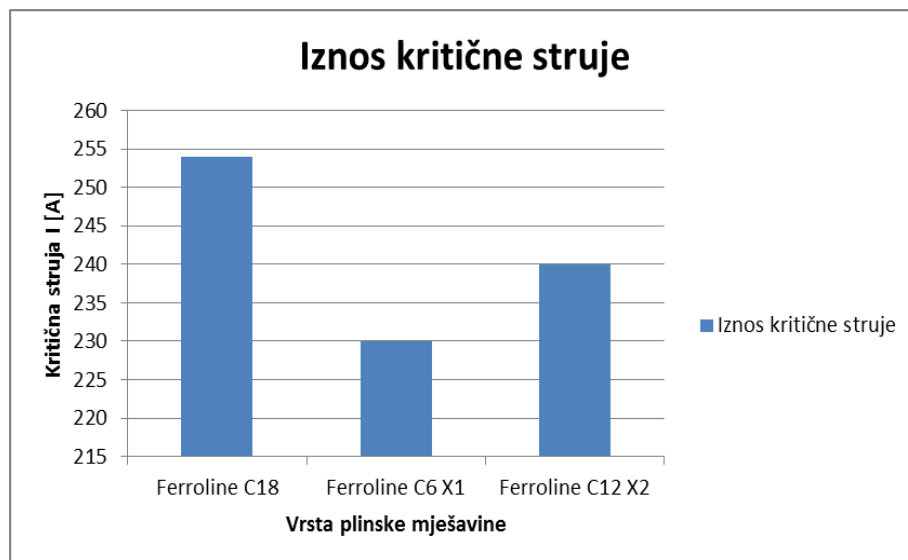
Kritičnu struju je vrlo teško točno odrediti jer ovisi o brojnim fizikalnim procesima električnog luka čija pak svojstva ovise o brojnim, prethodno navedenim parametrima. Teorijski gledano to je vrijednost struje zavarivanja kada frekvencija prijelaza rastaljenih kapljica elektrode i promjer istih raste ili dosegne maksimalnu vrijednost. Kvalitativno je to prikazano na slici 39.



Slika 39: Kvalitativni prikaz pojave kritične struje zavarivanja

2.4.2 Rezultati četrvtog dijela eksperimenta

Vrijednosti kritičnih struja zavarivanja za pojedinu plinsku mješavinu prikazane su dijagramom na slici 40.



Slika 40: Usporedba vrijednosti kritične struje za različite plinske mješavine

Vizualni izgled zavarenih spojeva nakon zavarivanja kritičnom vrijednosti struje za pojedinu plinsku mješavinu, prikazan je na slikama 41., 42. i 43.



- kritična struja zavarivanja: 254 A
- napon: 29,3 V
- brzina žice: 12,7 m/min
- brzina zavarivanja: 35 cm/min

Slika 41: Rezultat zavarivanja kritičnom strujom pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18*



- kritična struja zavarivanja: 230 A
- napon: 26,8 V
- brzina žice: 11,5 m/min
- brzina zavarivanja: 35 cm/min

Slika 42: Rezultat zavarivanja kritičnom strujom pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1*



- kritična struja zavarivanja: 240 A
- napon: 26,2 V
- brzina žice: 11,4 m/min
- brzina zavarivanja: 35 cm/min

Slika 43: Rezultat zavarivanja kritičnom strujom pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2*

Vizualnom kontrolom utvrđeno je da je zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1* pokazao najbolju kvalitetu. Naime, na površini zavarenog spoja K2 nalazi se znatno manje troske nego na zavarima K1 i K3. Isto tako, zavari izvedeni pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina imaju manje vrijednosti kritične struje zavarivanja te je izgled zavara položeniji nego kod zavara K1 gdje je vidljivo nadvišenje. Razlog tome je prisutnost kisika u trokomponentnim plinskim mješavinama koji povećava viskoznost taline zavara. Vrijednost kritične struje pri zavarivanju trokomponentnim plinskim mješavinama je manja zbog većeg udjela argona u kemijskom sastavu tih plinskih mješavina.

Isto tako, površina na zavarenom spoju i njegovoj okolini je čišća, odnosno s manje prskotina pri zavarivanju pod zaštitom trokomponentnim plinskim mješavinama, što ima za posljedicu kraće vrijeme čišćenja istog.

3 ZAKLJUČAK

U prvom dijelu eksperimenta provedena su ispitivanja kvalitete izvedbe zavarenog spoja na različitim kvalitetima površine čeličnog lima kvalitete S235 J2 GR, pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2*. Analizirano je zavarivanje na sačmarenj površini, površini sa okujinom (nesačmarena površina), nanešenim temeljnim premazom te površini sa namjerno stimuliranom općom korozijom (hrđom). Zavarivanje je izvedeno pri prijenosu materijala u impulsnom električnom luku. Pri zavarivanju na površini lima sa nanešenim temeljnim premazom, najbolje rezultate pokazala je trokomponentna plinska mješavina sa većim oksidacijskim potencijalom *Ferroline C12 X2*. Kao rezultat, zavareni spoj izveden pod zaštitom te plinske mješavine imao je, vizualno promatrano, manje grešaka na površini. Zavarivanje trokomponentnim plinskim mješavinama na čeličnom limu sa hrđom nije pokazalo bitne negativne razlike u parametrima zavarivanja (struja i napon zavarivanja, brzina zavarivanja) s obzirom na zavarivanje istim plinskim mješavinama na metalno čistom (sačmarenom) čeličnom limu. Dakle, trokomponentne plinske mješavine uspjele su „kompenzirati“ nepravilnost, odnosno hrđu na površini čeličnog lima. Pri zavarivanju čeličnog lima sa okujinom pod zaštitom trokomponentnih plinskih mješavina *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2* vidljiva je degradacija parametara zavarivanja što je uobičajeno zbog takvog stanja površine koji predstavlja iznimno loše površinsko stanje osnovnog materijala za kvalitetnu izvedbu zavarenog spoja.

U drugom dijelu eksperimenta uspoređuju se vizualni izgled površine metala zavara i penetracija te vrijednosti tvrdoća makro izbrusaka zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine *Ferroline C18* te trokomponentnih plinskih mješavina *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2*. Zavarivanje je izvedeno pri prijenosu materijala u štrcajućem električnom luku. Zavareni spojevi izvedeni pod zaštitom plinske mješavine *Ferroline C18* pokazali su veću vrijednost širine metala zavara te bočne penetracije metala zavara u osnovni materijal od navedenih trokomponentnih plinskih mješavina. Razlog tome je veći udio aktivne komponente, odnosno CO₂ u toj plinskoj mješavini koji potiče oblikovanje šire zone električnog luka a s time i šire područje metala zavara. Međutim, trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2* pokazale su veću vrijednost površine dubinske penetracije metala zavara u osnovni materijal. Razlog tome je povišeni udio plina argona u tim plinskim mješavinama, što za posljedicu ima prstasti izgled profila zavarenog

spoja sa užim područjem metala zavara i većom penetracijom. Vrijednosti tvrdoće zavarenih spojeva izvedenih pod zaštitom plinskih mješavina *Ferroline C18*, *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2* se međusobno bitno ne razlikuju i u granicama su vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala kvalitete S355 J2 + N. Razlog tome jest što opći konstrukcijski čelik navedene kvalitete ne pripada grupi konvencionalno zakaljivih čelika, dakle u svom kemijskom sastavu sadrži manje od 0,6 % ugljika te ne postoji opasnost od samozakaljivanja pri hlađenju metala zavara. Samozakaljivanje uzrokuje kod pojedinih vrsta čelika, povišenje udjela martenzitne faze u njihovoj mikrostrukturi što ima za posljedicu iznimno visoke vrijednosti tvrdoće u metalu zavara, a s time u vezi opasnost od pojava pukotina u zavaru zbog velikih razlika u distribuciji tvrdoće po poprečnom presjeku zavarenog spoja.

U trećem dijelu eksperimenta provedeno je ispitivanje zavarivanja čeličnog lima sa dvokomponentnom plinskom mješavinom *Ferroline C18* te sa trokomponentnim plinskim mješavinama *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2* u prisilnom položaju zavarivanja (PF položaj prema HR EN ISO 6947:2011), s ciljem usporedbe subjektivnog doživljaja zavarivanja atestiranog MAG zavarivača između različitih plinskih mješavina. Zavarivanje je izvedeno pri prijenosu materijala kratkim spojevima u električnom luku koji se općenito vrlo često primjenjuje u ovom položaju zavarivanja, zbog manjeg unosa topline što sprječava naglo razlijevanje taline zavara uslijed djelovanja gravitacijske sile. Najbolji rezultat zavarivanja postignut je pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine *Ferroline C12 X2* gdje je postignuta najveća brzina zavarivanja te bolje razlijevanje taline zavara za manji unos topline.

U posljednjem, četvrtom dijelu eksperimenta provedeno je zavarivanje čeličnog lima kvalitete S355J2 + N s ciljem određivanja kritične vrijednosti struje zavarivanja pri zavarivanju pod zaštitom plinskih mješavina *Ferroline C18*, *Ferroline C6 X1* i *Ferroline C12 X2*. Trokomponentne plinske mješavine koje sadrže veći udio argona u svom kemijskom sastavu doprinjele su smanjenju vrijednosti kritične struje, a posebno se u tome ističe trokomponentna plinska mješavina sa udjelom argona od 93 %, *Ferroline C6 X1*. Ujedno je i ta plinska mješavina pokazala najbolje rezultate pri vizualnoj kontroli kvalitete površine zavarenog spoja jer je na površini zavarenog spoja izvedenog pod njenom zaštitom bilo znatno manje troske i prskotina nego na ostalim plinskim mješavinama primjenjenim u ovom dijelu eksperimenta.

Tijekom proteklih nekoliko desetljeća razvoj plinskih mješavina za MAG zavarivanje, što dvokomponentnih što trokomponentnih, znatno raste. Razlog tome je poboljšanje kvalitete izvedbe zavarenih spojeva, kraće vrijeme zavarivanja u prisilnim položajima, bolja penetracija te zadnje, ako ne i najbitnije, smanjenje cijena plinskih mješavina. Trokomponentne plinske mješavine na osnovi argona i CO₂ pokazuju prednost nad konvencionalnim dvokomponentnim plinskim mješavinama na istoj osnovici, upravo u svim gore navedenim parametrima osim u cijeni. Naime, cijena tehničkog plina argona je i do tri puta veća od cijene CO₂, što je još uvijek značajniji razlog ne tako česte primjene trokomponentnih plinskih mješavina. Međutim, što je isplativo je vrlo često širok pojam upravo zbog različitosti uvjeta u proizvodnji diljem svijeta kao i eksploatacijskih uvjeta pojedinog zavarenog spoja na nekom proizvodu. U svakom slučaju, razvoj trokomponentnih plinskih mješavina pruža mogućnost individualnog kreiranja fizikalnih svojstava električnog luka za različite slučajeve u tehnologiji zavarivanja.

4 LITERATURA

- [1] M. Suban, J. Tušek: Osnovne značilnosti zaščitnih plinov in njihovih mešaníc za MIG/MAG varjenje, 1. del, Varilna tehnika, (1997) 1, pp 11-17
- [2] Garašić I.: MIG/MAG zavarivanje, predavanje za specijalizaciju koordinadora zavarivanja, Zagreb, 2010.
- [3] Garašić I.: Zavarivanje u plinskoj zaštiti, tema 1.6, predavanje za specijalizaciju koordinadora zavarivanja, Zagreb, 2010.
- [4] L. Bilić: Utjecaj plinova na svojstva zavarenog spoja pri MAG zavarivanju konstrukcijskih čelika; Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [5] <http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/c4200.pdf> [13.11.2015.]
- [6] M. Suban, J. Tušek: Osnovne značilnosti zaščitnih plinov in njihovih mešaníc za MIG/MAG varjenje, 1. del, Varilna tehnika, (1997) 1, pp 11-17
- [7] M. Suban, J. Tušek: Vpliv zaščitnih plinov in njihovih mešaníc za MIG/MAG varjenje na metalurške in mehanske lastnosti, 3. del, Varilna tehnika, (1997) 3, pp 75-79
- [8] Š. Andrić, S. Kralj: Primjena plinskih mješavina pri automatiziranom i robotiziranom zavarivanju, Zavarivanje, 30 (1987) 5, pp 271-278
- [9] <http://www.messer.hr/products/oplinovima/zastitniplinovizazavarivanje/index.html> [01.11.2015.]
- [10] Juraga I., Ljubić K., Živčić M.: Pogreške u zavarenim spojevima, HDTZ, treće izdanje, Zagreb, 2007.
- [11] http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAW_Wires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf
- [12] http://www.esabna.com/EUWeb/MIG_handbook/592mig4_10.htm [14.11.2015.]
- [13] Norma HR EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - plinovi i plinske mješavine za zavarivanje i srodne postupke i njihovu primjenu

- [14] Wolters M.: 3 component mixtures, Messer Group GmbH – Krefeld, Technology Managment Welding Technology (materijal s prezentacije)
- [15] <http://xvator.com/documents/S355%20European%20Standard%20Steel.pdf>
[22.11.2015.]
- [16] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> [22.11.2015.]
- [17] www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt
[10.11.2015.]
- [18] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.
- [19] Bilandžija J.: Pregled razvoja dodatnih materijala za MAG zavarivanje, završni rad, Zagreb, 2015.
- [20] <http://www.wballoys.co.uk/MIG/images/welding-short-circuiting-transfer.jpg>
[10.11.2015.]